



**SKRIPSI – ME 141501**

***SISTEM AIR INDEPENDENT PROPULSION PADA  
WAHANA BENAM***

Muhammad Nuraga Lazuardy Ramadhan  
NRP. 4212 100 117

Dosen Pembimbing:  
Ir. Sardono Sarwito, M.Sc

DEPARTEMEN TEKNIK SISTEM PERKAPALAN  
Fakultas Teknologi Kelautan  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2017

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*



## **FINAL PROJECT – ME 141501**

### **AIR INDEPENDENT PROPULSION SYSTEM ON SUBMERSIBLE**

Muhammad Nuraga Lazuardy Ramadhan  
NRP. 4212 100 117

Supervisor:  
Ir. Sardono Sarwito, M.Sc

DEPARTMENT OF MARINE ENGINEERING  
Faculty of Marine Technology  
Sepuluh Nopember Institut of Technology  
Surabaya 2017

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

**LEMBAR PENGESAHAN**  
**SISTEM AIR INDEPENDENT PROPULSION PADA**  
**WAHANA BENAM**

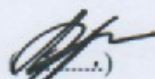
**TUGAS AKHIR**

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
pada  
Bidang Studi Marine Electrical and Automation System (MEAS)  
Program Studi S-1 Departemen Teknik Sistem Perkapalan  
Fakultas Teknologi Kelautan  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :  
**Muhammad Nuraga Lazuardy Ramadhan**  
Nrp. 4212 100 117

Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir :

1. Ir. Sardono Sarwito, M.Sc



**SURABAYA**  
**JANUARI, 2017**

**LEMBAR PENGESAHAN**  
**SISTEM AIR INDEPENDENT PROPULSION PADA**  
**WAHANA BENAM**

**TUGAS AKHIR**

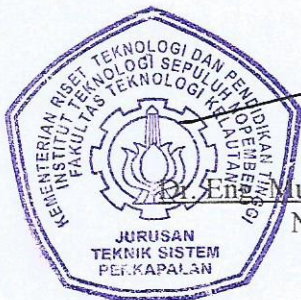
Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
pada

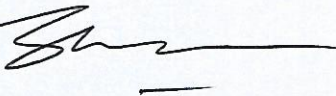
Bidang Studi Marine Electrical and Automation System (MEAS)  
Program Studi S-1 Departemen Teknik Sistem Perkapalan  
Fakultas Teknologi Kelautan  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

**Muhammad Nuraga Lazuardy Ramadhan**  
Nrp. 4212 100 117

Disetujui oleh Kepala Departemen Teknik Sistem Perkapalan :



  
Engr. Muhammad Badrus Zaman, S.T., M.T.  
NIP. 1977 0802 2008 01 1007

**SURABAYA**  
**JANUARI, 2017**

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## **SISTEM AIR INDEPENDENT PROPULSION PADA WAHANA BENAM**

**Nama Mahasiswa** : Muhammad Nuraga Lazuardy R.  
**NRP** : 4212100117  
**Jurusan** : Teknik Sistem Perkapalan  
**Dosen Pembimbing** : Ir. Sardono Sarwito, M.Sc.

### **ABSTRAK**

*Wahana benam berpenggerak diesel elektrik memiliki kelemahan utama akan terbatasnya sumber tenaga untuk penggerakannya. Seringkali wahana benam diesel elektrik muncul ke permukaan untuk mengisi baterai menggunakan diesel generator. Oleh karena itu, dibutuhkan sumber tenaga yang memungkinkan wahana benam bertahan lebih lama di dalam air tanpa harus muncul ke permukaan untuk mengisi baterai. Sistem tersebut bernama Air Independent Propulsion (AIP), yang dapat menambah endurance wahana benam diesel elektrik menjadi lebih lama di dalam air. Pada tugas akhir ini dipilih sistem AIP dengan jenis fuel cell, karena memiliki efisiensi yang tinggi, proses generasi energi tenang, dan proses kontrol sangat baik. Sistem ini memanfaatkan reaksi hidrogen dan oksigen untuk menghasilkan arus listrik dengan produk sampingan air dan energi panas. PEM Siemens fuel cell 120 kW dipilih untuk dipasangkan pada wahana benam objek. Perhitungan yang dilakukan meliputi perhitungan arus, perhitungan konsumsi oksigen dan hidrogen, perhitungan produksi air, dan perhitungan penambahan endurance kapal selam. Dari hasil perhitungan diketahui arus dari fuel cell, konsumsi hidrogen dan oksigen dalam satuan kilogram per jam, jumlah produksi air dalam liter per jam dan penambahan endurance di dalam air.*

**Kata Kunci:** AIP, Air Independent Propulsion, Fuel Cell



*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

# **AIR INDEPENDENT PROPULSION SYSTEM ON SUBMERSIBLE**

**Name** : Muhammad Nuraga Lazuardy R.  
**NRP** : 4212100117  
**Department** : Teknik Sistem Perkapalan  
**Supervisor** : Ir. Sardono Sarwito, M.Sc.

## **ABSTRACT**

*Diesel-electric submersible vehicle has a major disadvantage on limited source of energy for propulsion. Diesel-electric submersible vehicle going to surface to charge the battery by using diesel generator. Therefore, we need a source of energy that allows the submersible vehicle to last longer in the water without surfacing to charge the battery. The system is called Air Independent Propulsion (AIP), which can increase endurance diesel-electric submersible vehicle to be longer in the water. This final project selected AIP system with this type of fuel cell, because it has high efficiency, quiet energy generation process, and process control is very good. The system utilizes the reaction of hydrogen and oxygen to produce electrical current, water, and heat energy. A Siemens PEM fuel cell 120 kW have to be fitted on the submersible vehicle object. Calculations are including the calculation of the fuel cell current, oxygen and hydrogen consumption, calculation of water production, and the endurance for submersible vehicle. From the calculation results can be seen the current of the fuel cell, hydrogen and oxygen consumption in units of kg per hour, the production amount of water in liters per hour and increased endurance in the water.*

**Keywords:** AIP, Air Independent Propulsion, Fuel Cell

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## KATA PENGANTAR

Assalamualaikum warahmatullahi wabarakatuh.

Segala puji hanya bagi Allah SWT yang telah memberi petunjuk dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul “Sistem Air Independent Propulsion Pada Kapal Selam” dengan baik.

Penulis menyampaikan terima kasih kepada segenap pihak yang telah memberikan sumbangsih bantuan dan nasihat dalam proses pembuatan dan penyelesaian tugas akhir penulis, antara lain:

1. Bapak Dr. Eng Muhammad Badrus Zaman, ST., MT. selaku ketua departemen Teknik Sistem Perkapalan ITS dan Bapak Indra Ranu Kusuma, ST., M.Sc selaku kaprodi departemen Teknik Sistem Perkapalan ITS yang telah memberikan manajemen yang baik kepada mahasiswa.
2. Bapak Ir. Sardono Sarwito, M.Sc selaku dosen pembimbing yang telah memberikan ilmu, waktu untuk membimbing, saran, nasihat dan motivasi dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
3. Ayahanda tercinta Triyoga Widya Wahono, SE dan ibunda tercinta Nurul Sulistyorini, SE dan adik saya Dheandra Mutiara Kayana yang telah memberikan dukungna moral, kasih sayang, dan doa yang tidak pernah berhenti dipanjatkan sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini dengan baik.
4. Bapak Ir. Indra Cahya yang telah memberikan gambaran awal wahana benam, sehingga penulis dapat menemukan topik untuk dijadikan penelitian tugas akhir.
5. Annisa Ayu Asmiragani sekeluarga, terima kasih banyak atas doa dan dukungan yang diberikan selama ini sehingga penulis terpacu untuk menyelesaikan tugas akhir dengan baik.

6. Teman-teman angkatan 2012, senior, dan junior, dan seluruh teman-teman Teknik Sistem Perkapalan, serta semua pihak yang terkait secara langsung dan tidak langsung.

Penulis menyadari bahwa penulisan ini masih jauh dari sempurna, oleh karena itu penulis membuka diri untuk segala kritik dan saran yang membangun.

Akhirnya, semoga tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi pembaca khususnya di bidang Marine Engineering.

Surabaya, Januari 2017

Penulis

## DAFTAR ISI

ABSTRAK .....	ix
ABSTRACT .....	xi
KATA PENGANTAR.....	xiii
DAFTAR ISI.....	xv
DAFTAR GAMBAR .....	xix
DAFTAR TABEL .....	xxi
BAB I    PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan .....	2
1.4 Manfaat .....	2
1.5 Batasan Masalah.....	3
1.6 Sistematika Penulisan .....	3
BAB II    TINJAUAN PUSTAKA .....	5
2.1 Wahana Benam Secara Umum .....	5
2.2 Cara Mengapung dan Tenggelam pada Wahana Benam.....	6
2.3 Fungsi Hydroplane pada Wahana Benam .....	7
2.4 Sistem Penopang Hidup pada Wahana Benam .....	8
2.5 Sistem Navigasi pada Wahana Benam .....	8
2.6 Sejarah Teknologi AIP .....	9
2.7 Berbagai Jenis Teknologi AIP .....	11
2.8 Karakteristik Umum dari Fuel Cell .....	15
2.9 Berbagai Jenis Fuel Cell.....	20
2.9.1 Proton Exchange Membrane Fuel Cell .....	21

2.9.2 Alkaline Fuel Cell .....	22
2.9.3 Phosporic Acid Fuel Cell.....	23
2.9.4 Carbonate Fuel Cell .....	24
2.9.5 Solid Oxide Fuel Cell .....	24
2.10 Penyimpanan Hidrogen dan Oksigen.....	24
2.11 Perlengkapan Utama dari <i>Fuel Cell</i> .....	25
2.11.1 <i>Fuel Cell Module</i> .....	25
2.11.2 <i>H<sub>2</sub> Cylinder</i> .....	26
2.11.3 <i>LOX Tank</i> .....	27
2.12 Fuel Cell pada Wahana Benam.....	27
2.13 Persamaan-Persamaan Yang Digunakan Dalam Perhitungan Fuel Cell. ....	29
2.13.1 Perhitungan Tegangan Aktual Fuel Cell .....	29
2.13.2 Perhitungan Arus Fuel Cell .....	32
2.13.3 Perhitungan Konsumsi Hidrogen dan Oksigen .....	32
2.13.4 Perhitungan Efisiensi .....	33
2.13.5 Perhitungan Produksi Air dalam Liter per Jam .....	33
2.13.6 Perhitungan Kebutuhan Energi Minimal per Jam .....	33
2.13.7 Perhitungan Endurance Wahana Benam dengan Menggunakan Sistem Air Independent Propulsion dengan Jenis Fuel Cell	33
BAB III     METODOLOGI PENELITIAN.....	35
3.1 Studi Literatur .....	35
3.2 Penentuan Spesifikasi Fuel Cell .....	35
3.3 Perhitungan Tegangan Aktual Fuel Cell .....	35
3.4 Perhitungan Arus Fuel Cell .....	36

3.5 Perhitungan Konsumsi dan Kapasitas Tangki Hidrogen dan Oksigen .....	36
3.6 Perhitungan Produksi Air .....	36
3.7 Perhitungan Endurance Wahana Benam dengan Menggunakan Fuel Cell.....	37
3.8 Analisa dan Kesimpulan.....	37
3.9 Diagram Alir Pengerjaan Tugas khir .....	38
BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN .....	39
4.1 Analisa Data Wahana Benam Pembanding .....	39
4.2 Spesifikasi Fuel Cell dan Baterai.....	40
4.3 Tabel dari Parameter yang Digunakan untuk Perhitungan....	42
4.4 Perhitungan Tekanan Saturasi dari Air .....	42
4.5 Perhitungan Tekanan Parsial Air .....	43
4.6 Perhitungan Tekanan Parsial Hidrogen .....	43
4.7 Perhitungan Tekanan Parsial Oksigen .....	43
4.8 Perhitungan Ohmic Losses .....	44
4.9 Perhitungan Concentration Losses.....	44
4.10 Perhitungan Activation Losses .....	44
4.11 Perhitungan Tegangan Nernst.....	44
4.12 Perhitungan Tegangan Aktual Fuel Cell.....	45
4.13 Perhitungan Arus Fuel Cell .....	45
4.14 Perhitungan Konsumsi Hidrogen.....	45
4.15 Perhitungan Efisiensi.....	48
4.16 Perhitungan Produksi Air dalam Liter per Jam.....	48
4.17 Perhitungan Kebutuhan Energi Minimal per Jam .....	48
4.18 Lama Wahana Benam Dapat Bergerak .....	49



4.19 Perhitungan Penambahan Endurance Wahana Benam dengan Menggunakan Sistem Air Independent Propulsion dengan Jenis Fuel Cell.....	49
4.20 Perbandingan Daya Selam Sebelum dan Sesudah Menggunakan Sistem AIP Fuel Cell .....	51
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	53
5.1 Kesimpulan .....	53
5.2 Saran .....	54
DAFTAR PUSTAKA.....	55
BIODATA PENULIS.....	57

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Wahana benam Jerman tipe U-212A .....	5
Gambar 2.2	Ilustrasi wahana benam mengapung dan tenggelam .....	6
Gambar 2.3	Hydroplane .....	7
Gambar 2.4	Skema SINAVY PEM fuel cell.....	14
Gambar 2.5	Toyota Mirai .....	16
Gambar 2.6	Komponen pada Toyota Mirai.....	17
Gambar 2.7	Sistem fuel cell untuk pembangkit listrik .....	18
Gambar 2.8	Berbagai macam pengaplikasian dari fuel cell	19
Gambar 2.9	Segmentasi market fuel cell sesuai jenisnya ....	21
Gambar 2.10	Skema PEMFC.....	22
Gambar 2.11	Skema pressure hull dan outer hull pada wahana benam .....	25
Gambar 2.12	Fuel cell module .....	25
Gambar 2.13	Komponen dari fuel cell .....	26
Gambar 2.14	H <sub>2</sub> cylinder dan GRP casing .....	26
Gambar 2.15	Skema LOX tank .....	27
Gambar 2.16	Wahana benam dolphin class .....	28
Gambar 2.17	Skema wahana benam tanpa AIP .....	28
Gambar 2.18	Skema wahana benam dengan AIP .....	28
Gambar 3.1	Diagram alir pengerjaan tugas akhir .....	38
Gambar 4.1	Modul PEM fuel cell 120 Kw yang ditata di test rack .....	41
Gambar 4.2	Spesifikasi metal hydride cylinder storage.....	47
Gambar 4.3	Spesifikasi LOX tanks .....	47

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Hubungan jenis bahan bakar dan jenis fuel cell .....	20
Tabel 4.1	Spesifikasi wahana benam tipe-212 .....	39
Tabel 4.2	Spesifikasi wahana benam objek untuk penelitian tugas akhir .....	40
Tabel 4.3	Spesifikasi baterai dari objek yang diteliti .....	40
Tabel 4.4	Spesifikasi fuel cell yang dipilih .....	41
Tabel 4.5	Parameter yang digunakan untuk perhitungan ..	42
Tabel 4.6	Tangki penyimpanan hidrogen .....	47
Tabel 4.7	Tangki penyimpanan oksigen .....	48
Tabel 4.8	Data spesifikasi baterai dan endurance wahana benam .....	48
Tabel 4.9	Hasil perhitungan .....	51
Tabel 4.10	Perbandingan endurance sebelum dan sesudah menggunakan sistem AIP untuk wahana benam objek .....	51
Tabel 4.11	Perbandingan endurance sebelum dan sesudah menggunakan sistem AIP untuk wahana benam pendampin .....	51

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Wahana benam bergerak di bawah permukaan air, umumnya digunakan untuk tujuan dan kepentingan militer. Sebagian besar Angkatan Laut memiliki dan mengoperasikan wahana benam sekalipun jumlah dan populasinya masing-masing negara berbeda. Selain digunakan untuk kepentingan militer, wahana benam juga digunakan untuk ilmu pengetahuan laut dan air tawar dan untuk bertugas di kedalaman yang tidak sesuai untuk penyelam manusia. Wahana benam berdasarkan tenaga penggeraknya dibagi menjadi tiga yaitu *engineless*, diesel elektrik, dan tenaga nuklir.

Wahana benam *engineless* adalah wahana benam tanpa motor yang disebut *batysphere*, sebelum *batysphere* dikenal dengan *diving bell* berbentuk lonceng dalam air dengan lantai terbuka. Udara di pompa masuk oleh kru di atas air agar penyelam dapat tinggal lebih lama dalam air. Wahana benam bertenaga nuklir adalah wahana benam yang menggunakan reaktor air bertekanan atau PWR (*Presurizer Water Reactor*) sebagai sumber tenaga memutar turbin utama yang menggerakkan baling-baling serta motor elektrik pengisi baterai yang menghasilkan listrik untuk berbagai keperluan. Wahana benam bertenaga mesin diesel merupakan jenis wahana benam konvensional, mesin diesel dihidupkan jika wahana benam berada di permukaan air untuk mengisi baterai sebagai sumber listrik untuk menghidupkan motor elektrik yang memutar baling-baling saat menyelam. Pada wahana benam diesel modern, mesin dapat dihidupkan di kedalaman periskop, karena dilengkapi dengan saluran hisap dan buang mesin setinggi tiang periskop, sehingga wahana benam tidak harus berada di permukaan air. Wahana benam jenis ini mempunyai daya jangkauan yang terbatas karena kapasitas kebutuhan bahan bakar solar serta hanya mampu menyelam selama 5,5 jam saja, namun seiring perkembangan teknologi, wahana benam diesel elektrik

dapat menyelam lebih lama berkat adanya sistem AIP (*Air Independent Propulsion*). Dimana definisi dari sistem AIP adalah teknologi propulsi yang memungkinkan wahana benam non nuklir untuk beroperasi tanpa mendapat oksigen atmosfer (muncul ke permukaan atau menggunakan *snorkel*).

## 1.2 Perumusan Masalah

1. Bagaimana spesifikasi sistem AIP *fuel cell* untuk wahana benam?
2. Berapa kebutuhan konsumsi hidrogen dan oksigen dalam satuan kilogram per jam untuk mencukupi sistem *fuel cell*?
3. Berapa kapasitas tangki yang dibutuhkan untuk hidrogen dan oksigen?
4. Berapa produksi air sebagai salah satu hasil dari proses reaksi *fuel cell*?
5. Berapa lama *endurance* wahana benam didapatkan dengan menggunakan sistem AIP jenis *fuel cell*.

## 1.3 Tujuan

1. Mengetahui spesifikasi dari sistem AIP *fuel cell* untuk wahana benam.
2. Mengetahui berapa kebutuhan konsumsi hidrogen dan oksigen untuk menjalankan *fuel cell*.
3. Mengetahui kebutuhan kapasitas tangki dari hidrogen dan oksigen sebagai bahan bakar dari *fuel cell*.
4. Mengetahui jumlah air yang diproduksi dari *fuel cell*.
5. Mengetahui berapa lama *endurance* yang dicapai wahana benam dengan menggunakan sistem AIP jenis *fuel cell* dan mengetahui perbandingan sebelum dan sesudah menggunakan sistem AIP.

## 1.4 Manfaat

Mengetahui spesifikasi sistem AIP *fuel cell* yang tepat untuk wahana benam.

### 1.5 Batasan Masalah

1. Menggunakan teknologi *fuel cell*.
2. Menggunakan spesifikasi wahana benam yang telah ada.

### 1.6 Sistematika Penulisan

Bab satu adalah pendahuluan yang terdiri dari latar belakang, perumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, dan batasan masalah. Bab dua adalah tinjauan pustaka, yang membahas wahana benam secara umum, cara mengapung dan tenggelam dari wahana benam, fungsi *hydroplane* pada wahana benam, sejarah teknologi AIP, berbagai jenis teknologi AIP, berbagai jenis sistem *fuel cell*, *proton exchange membrane cell*, penyimpanan hidrogen dan oksigen, perlengkapan utama dari *fuel cell*, serta persamaan-persamaan yang digunakan dalam perhitungan *fuel cell*. Bab tiga berisi tentang metodologi penelitian dan diagram alir penelitian. Bab empat berisi tentang analisa data wahana benam pembanding, data wahana benam objek yang diteliti, spesifikasi baterai, spesifikasi *fuel cell* yang dipilih dan perhitungan. Bab lima berisi kesimpulan dan saran dari tugas akhir ini.



*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Wahana Benam Secara Umum**

Wahana benam bergerak di bawah permukaan air. Berbeda dengan kapal konvensional, wahana benam biasanya digunakan untuk tujuan militer. Sebagian besar militer dari negara-negara di dunia memiliki dan mengoperasikan wahana benam. Namun selain untuk tujuan militer, wahana benam juga digunakan untuk penelitian dalam laut dan untuk bertugas di kedalaman laut dimana penyelam tidak dapat melakukannya. Jerman adalah negara yang terkenal akan kekuatan militer wahana benamnya. Negara tersebut memiliki wahana benam yang cukup terkenal dengan sebutan *U-Boat* atau *U-class* yang merupakan kependekan dari *Unterseeboot*, yang mulai ditugaskan dalam perang dunia pertama sebagai sistem senjata yang mematikan bagi lawan terlebih lagi pada perang dunia kedua. Rusia adalah negara yang terkenal akan wahana benamnya selain Jerman. Wahana benam Jerman yang terkenal adalah tipe U-212 A.



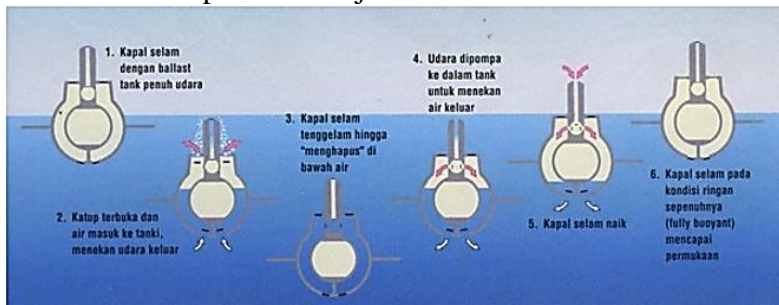
Gambar 2.1 Wahana benam Jerman tipe U-212 A

Wahana benam tersebut merupakan pengembangan dari tipe U-209. Wahana benam U-212A dapat menyelam di laut dalam maupun laut dangkal. Lambung dibuat dari baja *non-magnetic*

yang dilapisi dengan penyerap gelombang akustik, sehingga wahana benam tersebut hampir tidak menghasilkan radiasi panas dan suara. Kemampuan selam dari tipe U-212A adalah hingga kedalaman 230 meter di bawah air laut. Selain angkatan laut Jerman, angkatan laut Italia juga menggunakan wahana benam tersebut.

## 2.2 Cara Mengapung dan Tenggelam pada Wahana Benam

Sebuah wahana benam dapat mengapung karena berat air yang dipindahkan sama dengan berat wahana benam itu sendiri. Pemindahan berat air tersebut menimbulkan gaya ke atas yang disebut gaya apung atau *buoyancy force*. Gaya apung bekerja secara berlawanan dengan gaya gravitasi. Wahana benam tidak seperti kapal konvensional, wahana benam sanggup mengatur sendiri gaya apungnya. Sehingga wahana benam dapat muncul ke permukaan dan menyelam sesuai dengan keperluan. Gaya apung tersebut diatur melalui tangki-tangki pemberat dan tangki penyeimbang yang dapat diisi dengan air maupun dengan udara. Ketika wahana benam muncul ke permukaan, tangki pemberat diisi dengan udara sehingga membuat massa jenis keseluruhan dari wahana benam menjadi lebih kecil daripada massa jenis air laut. Dan ketika menyelam, tangki-tangki pemberat diisi dengan air, sedangkan udara yang sebelumnya ada di tangki pemberat dilepaskan keluar sampai massa jenis keseluruhan menjadi lebih besar daripada massa jenis air laut.



Gambar 2.2 Ilustrasi wahana benam mengapung dan tenggelam

### 2.3 Fungsi Hydroplane pada Wahana Benam

*Hydroplane* adalah perangkat-perangkat pada wahana benam dengan bentuk menyerupai sayap-sayap pendek pada bagian buritan wahana benam yang berfungsi untuk mengatur arah penyelaman. Perangkat *hydroplane* dapat diarahkan sehingga air dapat bergerak melewati buritan dan mendorong buritan ke atas sehingga wahana benam dapat bergerak ke bawah. Wahana benam menjaga tingkat kedalamannya dengan cara menjaga keseimbangan antara air dan udara dalam tangki penyeimbang sehingga massa jenis keseluruhan sama dengan massa jenis air di sekitarnya.



Gambar 2.3 Hydroplane

Pada saat wahana benam mencapai kedalaman jelajahnya, *hydroplane* akan diluruskan sehingga wahana benam bisa berjalan lurus. Kemudian air didorong di antara tangki penyeimbang haluan dan buritan dengan tujuan menjaga keseimbangan ketika massa jenis keseluruhan lebih kecil dari massa jenis air di sekitarnya dan wahana benam pun muncul ke permukaan. Sedangkan untuk berbelok ke kanan dan ke kiri, wahana benam menggunakan kemudi ekor dan dengan menggunakan *hydroplane* dapat mengatur

arah depan dan belakang wahana benam. Pada beberapa wahana benam juga dilengkapi dengan motor penggerak cadangan yang dapat diatur keluar masuknya sehingga wahana benam dapat berputar 360°.

## **2.4 Sistem Penopang Hidup pada Wahana Benam**

Terdapat tiga hal yang sangat penting berkaitan dengan penopang hidup di lingkungan wahana benam yaitu, menjaga kualitas udara, menjaga temperatur, dan menjaga suplai air bersih. Untuk menjaga kualitas udara dalam wahana benam oksigen yang dikonsumsi harus dapat diisi ulang. Karena apabila kru kekurangan oksigen dapat memicu sesak napas. Kemudian harus terdapat sistem yang menghilangkan karbondioksida dari udara untuk menghindari keracunan. Embun dari hembusan napas harus dihilangkan. Pasokan oksigen disimpan pada tangki bertekanan. Generator oksigen mengeluarkan oksigen dengan sebuah reaksi kimia yang panas. Oksigen dapat dikeluarkan terus menerus dan dikontrol kadarnya dalam udara oleh sistem terkomputerisasi. Suhu perairan dalam air laut berkisar 4°C, sehingga wahana benam terus menerus dipanaskan secara elektrik untuk menjaga suhu yang nyaman bagi awak wahana benam. Pemanas tersebut mendapat energi listrik dari baterai atau diesel. Yang terakhir untuk menopang hidup awak wahana benam dalam wahana benam adalah air bersih. Wahana benam kebanyakan memiliki sistem penyulingan air bersih yang bisa menarik air laut dan menghasilkan air bersih. Instalasi sistem penyulingan tersebut dapat menghasilkan 38.000-150.000 liter setiap harinya. Air tersebut digunakan untuk mendinginkan peralatan elektronik, serta untuk kebutuhan sehari-hari awak wahana benam.

## **2.5 Sistem Navigasi pada Wahana Benam**

Pada saat berada di bawah laut, cahaya sangatlah terbatas, karena cahaya tidak dapat menembus jauh ke dalam lautan. Oleh karena itu wahana benam dilengkapi dengan sistem navigasi yang canggih seperti GPS, *inertial guidance*, dan *SONAR system*. GPS adalah singkatan dari *global positioning system* adalah sistem yang

menggunakan 24 satelit yang mengirimkan sinyal gelombang mikro ke bumi. Sinyal ini diterima oleh alat penerima di permukaan untuk menentukan posisi, kecepatan, arah, dan waktu. Dengan sistem navigasi GPS, wahana benam tidak akan tersesat. *Inertial guidance* adalah sistem pemandu listrik mekanik yang menjaga jalur pergerakan wahana benam di air dari titik awal yang digunakan menggunakan *gyroscope*. Sistem ini akurat hingga 150 jam waktu operasi dan harus disetel ulang dengan sistem navigasi lain yang harus diakses di permukaan seperti GPS, radio, radar, satelit. Dengan menggunakan sistem ini wahana benam dapat ternavigasi secara akurat. Kemudian sistem sonar adalah sistem untuk dapat mengetahui letak atau posisi suatu target. Wahana benam menggunakan sistem sonar baik secara aktif maupun pasif. Sonar menggunakan gelombang suara bawah air yang dipancarkan dan dipantulkan untuk mendeteksi dan menetapkan lokasi objek bawah laut. Sistem ini juga dapat digunakan untuk mengukur kedalaman laut. Prinsip kerja dari sistem ini adalah dengan mengirim gelombang suara dan kemudian menunggu gelombang tersebut dipantulkan kembali.

## **2.6 Sejarah Teknologi AIP**

Wahana benam konvensional dilengkapi dengan sistem penggerak diesel elektrik. Untuk menyelam, energi untuk bergerak disimpan pada baterai. Kapasitas baterai tersebut membatasi kemampuan selam. Baterai diisi pada saat periode *snorkeling* dengan bantuan diesel *generator*. Oleh karena itu sangatlah penting untuk mengembangkan *Air Independent Propulsion (AIP) systems* yang memungkinkan ketahanan selam yang lebih lama. Persyaratan yang harus dipenuhi oleh sistem AIP adalah sebagai berikut:

- Beroperasi tanpa muncul ke permukaan dalam waktu yang lama.
- Tingkat kebisingan yang rendah.
- Tingkat magnetik yang rendah.
- Tingkat perpindahan panas ke air laut yang rendah.

Pada sekitar tahun 1970, berdasarkan studi dari *German Submarine Industry* dan *German Ministry of Defence* memutuskan bahwa *fuel cell* dapat menjadi solusi yang paling efektif untuk aplikasi pada wahana benam untuk memenuhi beberapa persyaratan, karena memiliki beberapa keuntungan yaitu:

- Efisiensi tinggi hingga 70%.
- Proses generasi energi sangat tenang.
- Proses operasi dan kontrol sangat baik.

Wahana benam *class 212A* milik Jerman dan Italia menggunakan sistem *fuel cell* yang berasal dari teknologi PEMFC Siemens di bawah kontrak dengan Kementerian Pertahanan Jerman. Untuk alasan keamanan modul dilindungi oleh sebuah *pressure-tight container*. *Volume container* kosong diisi oleh gas *inert* dan dimonitor kebocorannya. Berdasarkan modul 30-50 kW untuk *class 212A* sebuah modul yang lebih baru 120 kW PEMFC telah dikembangkan oleh SIEMENS. Dan telah siap untuk diproduksi.

Modul 120 kW dapat meningkatkan performa empat kali lipat pada berat dan dimensi yang sama dari pendahulunya. Untuk semua tipe *fuel cell* sampai tahun 2003, hidrogen disimpan di dalam *metal hydride cylinders*, dan oksigen disimpan disimpan dalam bentuk cair di tabung.

Dari penelitian A. Psoma dan G. Satller pada 2002 didapat kesimpulan sebagai berikut:

- Terdapat beberapa persyaratan untuk sebuah sistem AIP.
- Pada sekitar tahun 1970, berdasarkan studi dari *Germany Submarine Industry* dan *Germany Ministry of Defence* diputuskan bahwa *fuel cell* adalah yang paling efektif untuk wahana benam.

## 2.7 Berbagai Jenis Teknologi AIP

- **Closed Cycle Diesel Systems**

Sistem ini menggunakan pasokan oksigen untuk mengoperasikan mesin diesel ketika berada di kedalaman laut. Pada awalnya teknologi ini telah dicoba oleh Kriegsmarine dan kemudian diadopsi oleh Soviet Voenno-Morskii Flot di 30 wahana benaml kelas Quebec, dimana satu dari ketiga mesin dieselnnya dapat digunakan sebagai sistem AIP menggunakan pasokan oksigen cair atau yang disebut *liquid oxygen* (LOX). Pada desain sistem tersebut, oksigen dicampur dengan gas buang atau *inert gas* untuk melindungi komponen mesin. Pada wahana benam Soviet memiliki berbagai masalah saat beroperasi seperti, rentan terhadap kebakaran, daya tahan yang terbatas karena LOX yang menguap karena panas. Wahana benam tersebut telah disekrap pada tahun 1970an.

- **Closed Cycle Steam Turbine**

Sistem *closed cycle steam turbine* dapat dibandingkan dengan sistem nuklir karena panas digunakan untuk menghasilkan uap melalui sebuah turbin atau *turbo generator package* untuk menggerakkan sistem propulsi. *Nuclear pile*, diganti dengan pasokan oksigen sebagai sumber panas untuk pembakaran. DCN di Perancis menawarkan sistem MESMA (*Modul d'Energie Sous-Marine Autonome*) pada sebuah wahana benam kelas Scorpene yang dipanjangkan 8,5 meter pada bagian lambungnya. Sistem MESMA membakar ethanol, menggunakan LOX sebagai *oxidiser*. Campuran propelan dibakar pada tekanan 60 atm. DCN mengklaim sistem ini dapat meningkatkan daya selam wahana benam kelas Scorpene hingga tiga kali lipat atau sekitar 18 hari. Seperti LOX pada sistem *closed cycle diesel*, MESMA akan terbatas pada jumlah pasokan LOX dan penyimpanan LOX tersebut.



- **Stirling Engines**

Teknologi *stirling engines* telah ada sejak 1816, tetapi baru-baru ini saja memasuki tahap produksi untuk aplikasi sistem AIP pada wahana benam. *Stirling Engines* seringkali dibandingkan dengan *reciprocating steam engines*, karena keduanya menggunakan kumpulan *piston-cylinder*, namun berbeda prinsip, karena fluida kerja di dalam *engine* ditutup dan dipisahkan dari sumber panas, di dalam sebuah *closed cycle arrangement*. Panas disediakan untuk *stirling engine* dan berasal dari pembakaran luar antara bahan bakar dan *oxidiser*. *The Swedish Kockums AIP Systems* menggunakan LOX sebagai *oxidiser* dan diesel sebagai bahan bakar, yang dibakar pada tekanan lebih tinggi dari air di sekelilingnya. *Stirling engine* dihubungkan dengan *generator* untuk menyuplai sistem kelistrikan utama wahana benam. Seperti sistem AIP lainnya yang menggunakan LOX, sistem ini terkendala pada daya tahan yang dicapai karena jumlah pasokan LOX yang terbatas.

- **Fuel Cell Systems**

Sistem AIP *Fuel Cell* memanfaatkan *hydrogen oxygen fuel cell* untuk menghasilkan arus listrik, yang kemudian digunakan untuk menggerakkan wahana benam. Sel bahan bakar telah sukses digunakan untuk kapal luar angkasa yang menggunakan LOX dan hidrogen cair sebagai propelan utamanya. Masalah utama dari sistem ini adalah dimana peletakan pasokan oksigen dan hidrogen sebelum masuk ke dalam sel bahan bakar. Sel bahan bakar menghasilkan air suling sebagai limbahnya. Keunggulan sistem ini dibandingkan dengan *closed cycle diesel system* dan *turbine system* adalah sistem ini tidak berisik atau dengan kata lain tenang.

Pada tugas akhir ini digunakan teknologi AIP dengan jenis *fuel cell*. Cara kerja suatu unit *fuel cell* dapat diilustrasikan dengan jenis PEMFC (*proton exchange membrane fuel cell*). Jenis ini adalah jenis *fuel cell* yang menggunakan reaksi kimia paling sederhana. PEMFC memiliki empat elemen dasar seperti kebanyakan jenis *fuel cell*.

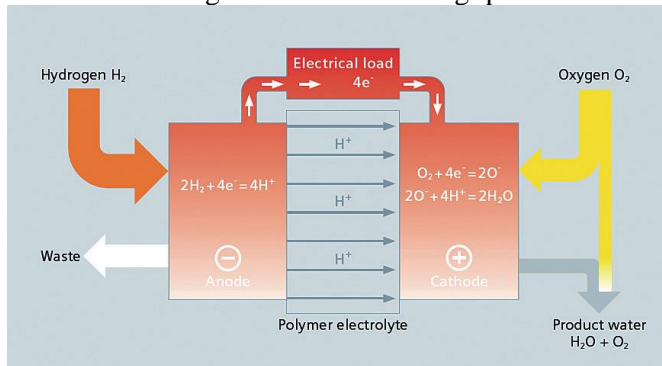
Pertama, anoda sebagai kutub negatif *fuel cell*. Anoda merupakan elektroda yang akan mengalirkan elektron yang lepas dari molekul hidrogen sehingga elektron tersebut dapat digunakan di luar sirkuit. Pada materialnya terdapat saluran-saluran agar gas hidrogen dapat menyebar ke seluruh permukaan katalis.

Kedua, katoda sebagai kutub elektroda positif *fuel cell* yang juga memiliki saluran yang akan menyebarkan oksigen ke seluruh permukaan katalis. Katoda juga berperan dalam mengalirkan elektron dari luar sirkuit ke dalam sirkuit sehingga elektron-elektron tersebut dapat bergabung dengan ion hidrogen dan oksigen untuk membentuk air.

Ketiga, elektrolit. Yang digunakan dalam PEMFC adalah membran pertukaran proton (*proton exchange membrane*/PEM). Material ini berbentuk seperti plastik pembungkus yang hanya dapat mengalirkan ion bermuatan positif. Sedangkan elektron yang bermuatan negatif tidak akan melalui membran ini. Dengan kata lain, membran ini akan menahan elektron. Keempat, katalis yang digunakan untuk memfasilitasi reaksi oksigen dan hidrogen. Katalis umumnya terbuat dari lembaran kertas karbon yang diberi selapis tipis bubuk platina. Permukaan katalis selalu berpori dan kasar sehingga seluruh area permukaan platina dapat dicapai hidrogen dan oksigen. Lapisan platina katalis berbatasan langsung dengan membran penukar ion positif, PEM.

Pada ilustrasi cara kerja PEMFC, diperlihatkan gas hidrogen yang memiliki tekanan tertentu memasuki *fuel cell* di kutub anoda. Gas hidrogen ini akan bereaksi dengan katalis dengan dorongan dari tekanan. Ketika molekul  $H_2$  kontak dengan platinum pada katalis, molekul akan terpisah menjadi empat ion  $H^+$  dan empat elektron ( $e^-$ ). Elektron akan mengalir melalui anoda,

elektron-elektron ini akan membuat jalur di luar sirkuit *fuel cell* dan melakukan kerja listrik, kemudian mengalir kembali ke kutub katoda pada *fuel cell*. Di sisi lain, pada kutub katoda *fuel cell*, gas oksigen ( $O_2$ ) didorong gaya tekan kemudian bereaksi dengan katalis membentuk dua atom oksigen. Setiap atom oksigen ini memiliki muatan negatif yang sangat besar. Muatan negatif ini akan menarik dua ion  $H^+$  keluar dari membran PEM, lalu ion-ion ini bergabung dengan satu atom oksigen dan elektron-elektron dari luar sirkuit untuk membentuk molekul air ( $H_2O$ ). Pada satu unit *fuel cell* terjadi reaksi kimia yang terjadi di anoda dan katoda. Reaksi yang terjadi pada anoda adalah  $2H_2 + 4e^- \rightarrow 4H^+$  Sementara reaksi yang terjadi pada katoda adalah  $O_2 + 4e^- \rightarrow 2O^-$ . Sehingga keseluruhan reaksi pada *fuel cell* adalah  $2O^- + 4H^+ \rightarrow 2H_2O$ . Hasil samping reaksi kimia ini adalah aliran elektron yang menghasilkan arus listrik untuk mengisi baterai serta energi panas dari reaksi.



Gambar 2.4 Skema SINAVY PEM Fuel Cell

Listrik dari baterai tersebut nantinya akan digunakan untuk kebutuhan listrik wahana benam dan menggerakkan baling-baling untuk bergerak. Jerman dikenal sebagai pemimpin dunia dalam mengembangkan AIP jenis ini, yang didukung oleh sejumlah besar pesanan ekspor yang mereka terima. Sedangkan Prancis sedang mengembangkan *fuel cell* generasi baru sebagai penerus MESMA milik mereka. India adalah negara lain yang sedang mengembangkan *fuel cell* AIP untuk diintegrasikan pada wahana

benam mereka. *Fuel cell* menjadi teknologi AIP paling canggih dan disukai saat ini. Hal ini karena keuntungan utama yang ditawarkan dalam hal ketenangan. *Fuel cell* dapat mencapai efisiensi lebih dari 70% dalam keadaan tertentu. *Fuel cell* juga sangat ramah lingkungan karena mereka tidak menghasilkan asap knalpot. Sistem AIP ini dapat diterapkan pada wahana benam konvensional. Teknologi ini juga dapat membuat wahana benam bertahan di kedalaman laut selama 3-4 minggu tanpa muncul ke permukaan. Satu-satunya kelemahan adalah teknologi ini cukup mahal.

## 2.8 Karakteristik Umum dari Fuel Cell

Teknologi *fuel cell* dapat mengubah energi kimia menjadi energi listrik secara kontinyu. Terdapat persamaan antara *fuel cell* dengan baterai, dimana pada keduanya terjadi proses elektrokimia yang menghasilkan arus listrik searah DC. *Fuel cell* dapat juga dijadikan pembangkit listrik dengan menambahkan *inverter* agar keluaran arus menjadi bolak-balik (AC). Namun ada perbedaan mendasar antara *fuel cell* dengan baterai. Perbedaan tersebut adalah pada baterai sumber energi menjadi satu kesatuan sehingga jika habis terpakai, maka perlu diganti atau diisi kembali. Sedangkan pada *fuel cell* sumber energi dapat diberikan secara kontinyu yang berasal dari sumber dari luar sistem.

Sistem *fuel cell* unggul dibanding pembangkit listrik dengan jenis lain pada penggunaan bahan bakar non fosil, konversi energi yang lebih sempurna, efisiensi tinggi, energi panas dari proses generasi energi dapat digunakan kembali, ramah lingkungan, minim getaran, tidak berisik, ukuran fleksibel sesuai ukuran, keandalan yang tinggi, dan dapat diaplikasikan untuk berbagai macam keperluan, seperti transportasi, (kereta, mobil, bis, kapal, wahana benam), pembangkit listrik dan lain-lain. Bahkan salah satu produsen mobil Jepang telah mengaplikasikannya pada kendaraan sedan secara komersil demi mewujudkan teknologi yang ramah lingkungan.

Pada Toyota Mirai terdapat beberapa komponen utama, seperti *power control unit*, motor elektrik, *boost converter*, *fuel cell*

*stack*, tangki hidrogen, dan baterai. *Power control unit* berperan untuk mengatur penggunaan energi dari baterai atau dari *fuel cell stack*. PCU ini mengambil basis dari mobil *hybrid* Toyota Prius. *Boost converter* berperan untuk menaikkan tegangan hingga 650 volt. Berkendara dengan tegangan tinggi dapat memberikan efisiensi yang tinggi dari motor.

*Fuel cell stack* mengkombinasikan hidrogen dan oksigen dari udara bebas untuk menghasilkan arus listrik. Tangki hidrogen berjumlah empat yang dapat diisi ulang. Baterai digunakan untuk menyimpan tenaga listrik yang diproduksi oleh *fuel cell*.



Gambar 2.5 Toyota Mirai



### The Power Control Unit

The PCU decides when to use stored energy from the battery or to draw energy directly from the fuel cell stack. This is part of what makes the Mirai so energy efficient, and is based on the Toyota hybrid PCU found in the Prius.



### The Motor

For the electric motor, we chose an existing motor from one of our Lexus hybrid vehicles, providing a history of reliability and reducing overall cost.



### The Boost Converter

Our four-phase boost converter brings voltage to 650 volts. Driving at a higher voltage makes more efficient use of the motor, matching the Mirai's power output to Toyota's other hybrids. This is a key factor in allowing Toyota to use the battery, PCU and motor from other Toyota and Lexus vehicles.



### The Fuel Cell Stack

The stack generates power by combining hydrogen with oxygen from the outside air. Currently, Toyota leads the industry in this technology, achieving the highest power output while dramatically reducing the system's price and size from its previous fuel cell vehicles.



### The Hydrogen Tanks

All of our hydrogen tanks are produced in-house and specially designed for the Mirai. Toyota's origins as a loom-weaving business helped our engineers design the carbon fiber weaving on our tanks, significantly reducing production time and improving the weight-to-storage ratio.



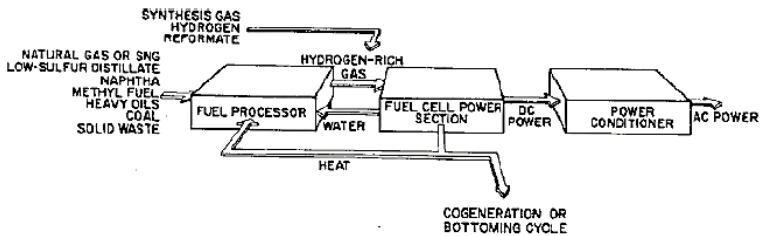
### The Battery

The battery allows for regenerative braking and also assists during high power demands like accelerating, improving total system efficiency and fuel economy. Like the motor, the battery is an existing design from one of our Toyota hybrid.



Gambar 2.6 Komponen pada Toyota Mirai

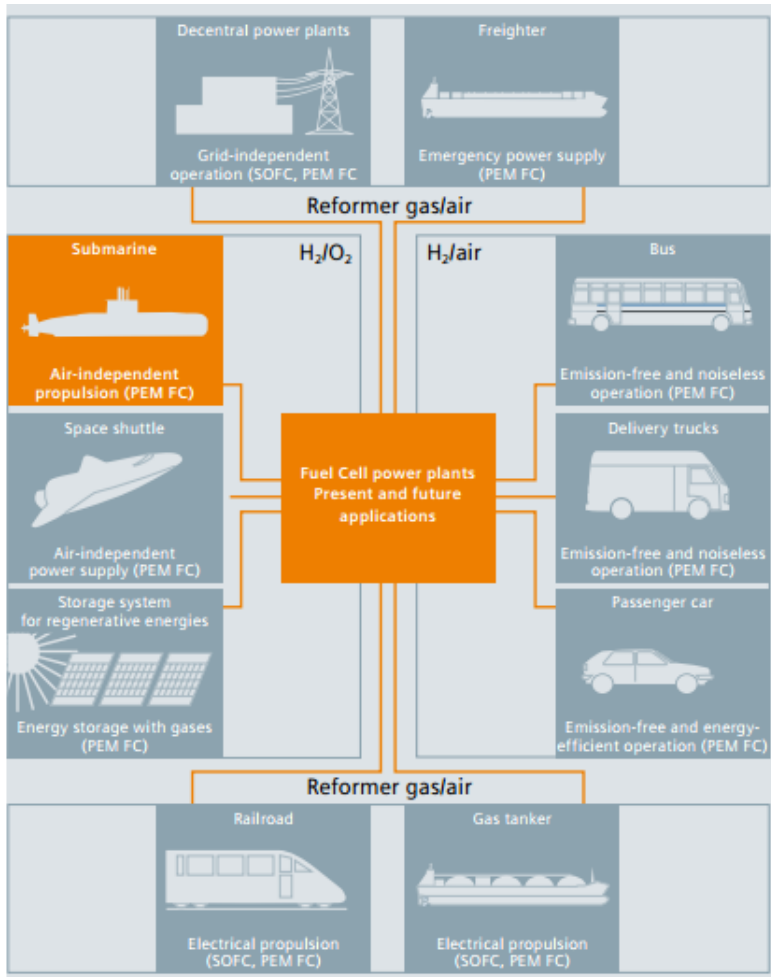
Untuk pengaplikasian *fuel cell* sebagai pembangkit listrik digambarkan pada gambar berikut.



Gambar 2.7 Sistem fuel cell untuk pembangkit listrik

Dari gambar di atas, terdapat beberapa subsistem yaitu:

- *Fuel cell power section*, terdiri dari satu atau lebih *fuel cell stack*. Digunakan untuk menghasilkan arus listrik DC menggunakan reaksi kimia menjadi energi listrik.
- *Fuel cell processor*, adalah bagian yang mengatur pemasukan bahan bakar ke *power section*. Bekerja pada suhu tinggi 400°C-900°C. Bagian ini memproduksi hidrogen dari bahan bakar seperti, bahan bakar metil, gas alam dan lain-lain.
- *Power conditioner*, mengubah keluaran dari *power section*, menjadi daya dan kualitas yang diperlukan pengguna. Pada bagian ini terdapat juga *inverter* untuk mengubah arus DC menjadi AC dan *converter* DC/DC.
- *Cogeneration*, adalah bagian yang mengatur keluaran dari *power section*, berupa air panas, uap panas agar dapat digunakan kembali, atau dikombinasi dengan sistem pembangkit lain.



Gambar 2.8 Berbagai macam pengaplikasian dari *fuel cell*

Untuk setiap unit *fuel cell* terdiri atas bahan elektrolit yang diapit antara anoda dan katoda. Umumnya bahan bakar yang digunakan adalah hidrogen sedangkan oksidan yang digunakan berasal dari udara bebas yaitu oksigen. Elektrolit sendiri berguna



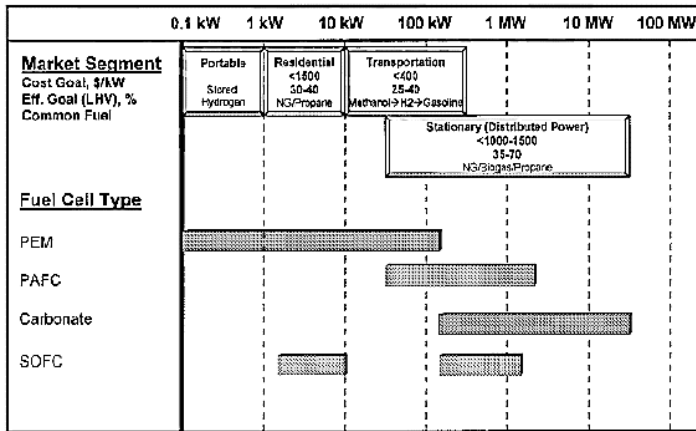
untuk menghantarkan ion, yang dapat berupa ion positif maupun ion negatif, yang kerjanya diatur dengan pengaturan temperatur. Jenis *fuel cell* sangat beragam seperti, *proton exchange membrane fuel cell*, *alkaline fuel cell*, *phosphoric acid fuel cell*, *carbonate fuel cell*, *solid oxide fuel cell*. Tiap jenis gas dapat memberikan hasil yang berbeda-beda untuk tiap jenis *fuel cell*. Berikut ini adalah tabel hubungan dari bahan bakar dan jenis *fuel cell*.

Tabel 2.1 Hubungan jenis bahan bakar dan jenis *fuel cell*

Fuel Constituents	PEM	AFC	PAFC	Carbonate	SOFC
H <sub>2</sub>	Fuel	Fuel	Fuel	Fuel	Fuel
CO	Poison	Poison	Poison (>0.5%)	Fuel	Fuel
CH <sub>4</sub>	Diluent	Diluent	Diluent	Fuel <sup>a</sup>	Fuel <sup>a</sup>
CO <sub>2</sub>	Diluent	Poison	Diluent	Diluent	Diluent
N <sub>2</sub>	Diluent	Diluent	Diluent	Diluent	Diluent
S as (H <sub>2</sub> S & COS)	Poison	Poison	Poison (>50 ppm)	Poison	Poison
NH <sub>3</sub>	Poison	Inert	Poison	Fuel	No Information

## 2.9 Berbagai Jenis Fuel Cell

*Fuel cell* terdiri dari berbagai jenis dan dibuat untuk segmen yang berbeda-beda sesuai kebutuhan. Hal yang membedakan antara jenis satu dan yang lainnya adalah, daya yang dihasilkan, desain konstruksi, kecepatan daya yang dihasilkan dan temperatur. Sebenarnya teknologi *fuel cell* yang beroperasi pada temperatur rendah telah digunakan pada peralatan portabel seperti laptop, pemukiman, dan alat transportasi. Sedangkan teknologi *fuel cell* yang memiliki temperatur tinggi telah banyak digunakan pada pembangkit yang cukup besar.

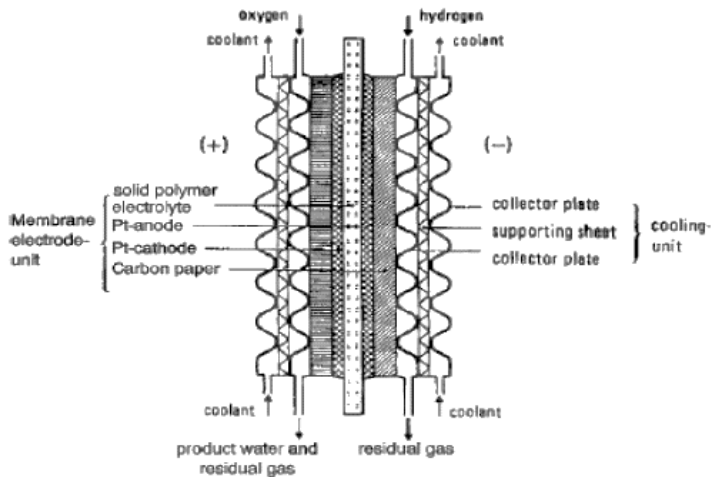


Gambar 2.9 Segmentasi market fuel cell sesuai jenisnya

Pada dasarnya seluruh jenis *fuel cell* memiliki cara kerja dan karakteristik yang tidak jauh berbeda. Hal yang membedakan adalah struktur dari bahan pembentuknya, bahan bakar yang digunakan, temperatur operasi, pengaplikasiannya, serta besaran daya yang dihasilkan dari proses generasi energi. Berikut ini adalah jenis-jenis teknologi *fuel cell*.

### 2.9.1 Proton Exchange Membrane Fuel Cell

Dinamakan *proton exchange membrane fuel cell* karena menggunakan proton sebagai konduktor melewati membran dari bahan polimer yang berfungsi sebagai elektrolit dari anoda ke katoda. Maka dari itu biasa disebut juga dengan *polimer electrolite fuel cell* (PEFC). Platina digunakan sebagai katalisator yang melapisi 2 elektroda.



Gambar 2.10 Skema PEMFC

Bekerja pada suhu rendah ( $60^{\circ}\text{C}$ - $80^{\circ}\text{C}$ ) menggunakan hidrogen murni dalam bentuk gas sebagai sumber bahan bakar yang akan dialirkan ke anoda dengan tekanan yang konstan. Hidrogen yang menyebar di anoda akan dibantu katalisator, dari bahan platina, untuk melepaskan elektron menuju sirkuit eksternal (beban diluar sistem) dan ion positif hidrogen (proton) yang akan dialirkan menuju katoda. Bahan bakar yang digunakan ialah hidrogen murni, oleh karenanya dibutuhkan alat yang dapat mengkonversi bensin, solar, gas alam, metanol, hidrida atau sumber hidrogen lain untuk menjadi hidrogen yang dipakai pada *fuel cell stack*, alat ini biasa disebut reformer.

## 2.9.2 Alkaline Fuel Cell

*Alkaline fuel cell* adalah jenis *fuel cell* yang menggunakan KOH sebagai elektrolit. Temperatur operasi sangat bergantung pada konsentrasi KOH. Apabila konsentrasi KOH adalah 35-50% maka temperatur yang dicapai  $<120^{\circ}\text{C}$ . Reaktan *alkaline fuel cell* adalah hidrogen murni, dan oksigen atau karbondioksida murni.

*Fuel cell* jenis ini sanggup memberi performa yang baik dalam hal penggunaan hidrogen dan oksigen dibandingkan jenis yang lain. *Alkaline fuel cell* juga pernah digunakan badan antariksa Amerika (NASA) untuk pesawat luar angkasanya sebelum diganti dengan jenis PEMFC. AFC menghasilkan racun karbon monoksida. Selain itu kelemahan dari jenis ini adalah karbon dioksida memberikan reaksi yang buruk karena dapat bereaksi dengan elektrolit yang ada sehingga elektrolit menjadi berkurang. *Fuel cell* ini masih memerlukan pengembangan teknologi dan desain penyimpanan hidrogen yang tepat.

### 2.9.3 Phosphoric Acid Fuel Cell

*Phosphoric acid fuel cell* memanfaatkan asam fosfor sebagai elektrolit yang bekerja pada temperature operasi 200°C. Jenis *fuel cell* ini mampu dioperasikan pada udara lembam, serta menggunakan CO<sub>2</sub> dan uap hidrogen untuk bahan bakarnya. Sistem ini tidak menggunakan gas karbon dioksida tetapi berbeda tidak seperti AFC dan PEMFC, PAFC tetap dapat beroperasi meski dengan performa yang minimal. Terdapat persamaan antara PEMFC dengan PAFC, yaitu sama-sama menggunakan katalis dari bahan platina yang harganya mahal pada kedua elektrodanya. Energi panas dari hasil proses generasi energi cukup tinggi untuk digunakan memanaskan air dan meningkatkan tekanan uap pada sistem. PAFC yang bertemperatur tinggi ini tidak dapat menyokong kinerja *reformer* bahan bakar umum seperti gas alam. Maka dari itu dibutuhkan *reformer* eksternal yang beroperasi pada temperatur tinggi untuk mengubah ikatan bahan bakar hidrokarbon menjadi hidrogen. Sistem *fuel cell* ini diperkenalkan pada tahun 1992, dengan pilihan ukuran daya mencapai 200 kW yang difungsikan untuk pembangkit listrik dan untuk pemanas. Kelemahan mendasar dari jenis ini terletak pada manajemen panas yang banyak terbuang sia-sia, dan masih bergantung dengan bahan katalisator yang mahal.

### 2.9.4 Carbonate Fuel Cell

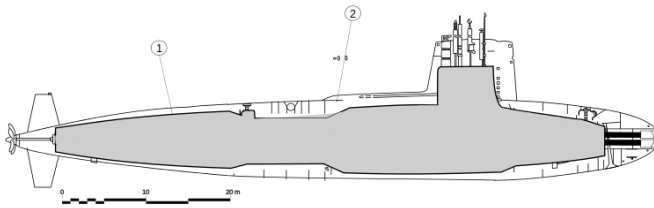
Jenis *fuel cell* ini elektrolit yang digunakan merupakan perpaduan dari jenis *alkaline* dan *carbonate* CFC. Pada *fuel cell* ini yang berpindah di elektrolit bukanlah ion positif hidrogen melainkan electron. *Fuel cell* ini beroperasi pada temperature sangat tinggi 500°C-650°C. Elektroda yang digunakan berbahan nikel yang bereaksi dengan cepat. Keuntungan lain dari *fuel cell* jenis ini adalah dapat menggunakan gas karbon monoksida sebagai bahan bakarnya, serta memiliki efisiensi yang tinggi. Karena temperature kerja yang sangat tinggi maka dapat menggunakan *reformer* internal. Kekurangan dari jenis ini adalah korosi pada *cell*-nya. Aplikasi dari sistem ini adalah pembangkit listrik komersial.

### 2.9.5 Solid Oxide Fuel Cell

Jenis *fuel cell* ini menggunakan elektrolit berbahan *solid nonporous ceramic*. Bekerja pada temperatur sangat tinggi yaitu 800°C-1000°C. Sangat cukup untuk menggunakan *internal reformer*. Kemudian elektroda terbuat dari material keramik. Gas karbon monoksida digunakan untuk bahan bakar. Kelemahan dari jenis ini adalah korosi. Saat ini tengah dikembangkan SOFC yang dapat bekerja pada temperature lebih rendah sekitar 600°C-800°C. Sehingga korosi dapat lebih ditekan. Aplikasi dari SOFC adalah pembangkit listrik stasioner.

## 2.10 Penyimpanan Hidrogen dan Oksigen

*Pure hydrogen* (99,999% *up purity*) bertindak sebagai sumber energi dari proses elektrokimia di *fuel cell* disimpan di dalam *metal hydride cylinders* di luar *pressure hull* pada wahana benam. *Pure oxygen* (99,5% *up purity*) disimpan dalam bentuk cair dalam bentuk tangki atau biasa disebut *LOX tank* di dalam *pressure hull* wahana benam.



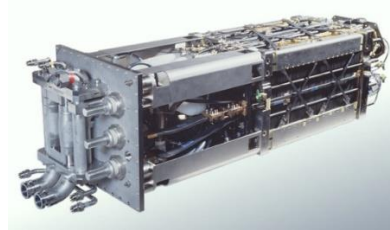
Gambar 2.11 Skema pressure hull dan outer hull pada wahana benam

Pada gambar 3, bagian nomer 1 adalah *pressure hull* sedangkan nomer 2 adalah *outer hull* pada wahana benam.

## 2.11 Perlengkapan Utama dari *Fuel Cell*

### 2.11.1 *Fuel Cell Module*

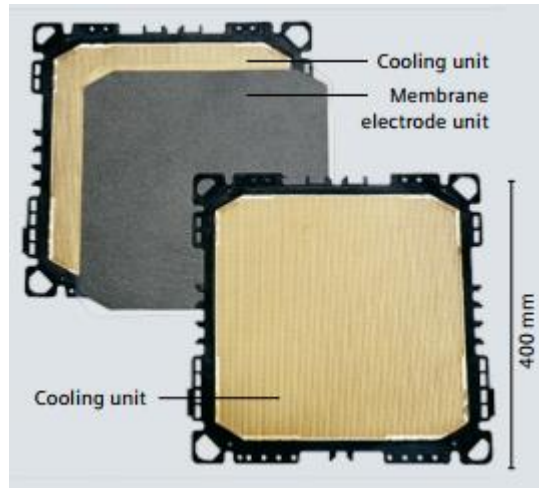
*Fuel cell module* dilindungi oleh *pressure container*. Sisi depan adalah area instalasi untuk semua pipa dari *media supply* dan kabel listrik DC. *Electro-chemical converter (fuel cell stack dan humidifier)* dan juga perangkat lain yang dibutuhkan untuk mengoperasikan *fuel cell* terletak di dalam *fuel cell module*. Di dalam *fuel cell module* gas dilembapkan terlebih dahulu sebelum memasuki *fuel cell stack*. Proses generasi arus listrik terjadi pada *fuel cell stack*.



Gambar 2.12 Fuel Cell Module

*Fuel cell stack* terdiri dari beberapa *single cell* dimana *single cell* terdiri dari komponen utama:

- *Membrane-electrode unit*
- *Cooling unit.*



Gambar 2.13 Komponen dari cell

### 2.11.2 H<sub>2</sub> Cylinder

Hidrogen bertindak sebagai sumber energi dari proses elektrokimia di *fuel cell* disimpan di dalam *metal hydride cylinders* di luar *pressure hull* pada wahana benam. *Metal hydrides* tersebut memiliki ruang kosong pada *metal lattice structure*, yang dapat diisi dengan proses bolak-balik dengan atom hidrogen.



Gambar 2.14 H<sub>2</sub> Cylinder dan GRP Casing

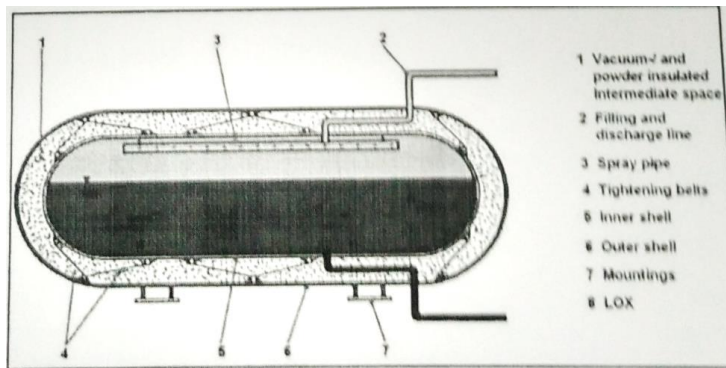
H<sub>2</sub> *storage cylinder* terdiri dari *storage container* dengan *valve* dan *gas filling tube* dan *stacking box* dengan *metal hydride*. *Storage container* dilas untuk kedap udara dan bagian dalam dan

luarnya dibuat tahan terhadap tekanan. Di dalam *storage container* terdapat *metal hydride* dalam coran berbentuk *disk*..

### 2.11.3 LOX Tank

Oksigen disimpan dalam bentuk cair dalam sebuah *special insulation tank*. *Evaporator* menggunakan sisa panas seperti *chilled water* selama pengoperasian *fuel cell*. Selain itu oksigen cair dapat menjadi sumber udara untuk para kru. LOX tank terdiri dari:

- *Inner tank* untuk menyimpan *liquid oxygen*.
- *Outer tank* untuk *insulation* dan *vacuum tank*.
- *Fitting cabinet* dengan *mount*.

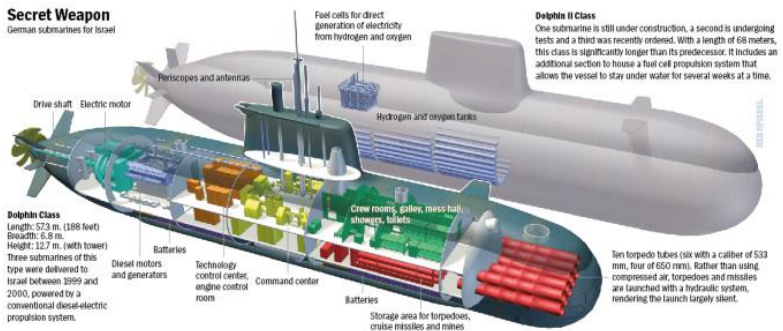


Gambar 2.15 Skema LOX Tank

### 2.12 Fuel Cell pada Wahana Benam

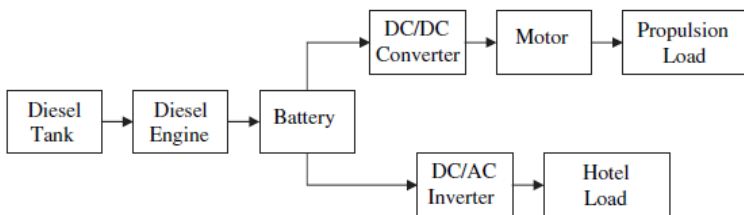
Pada wahana benam *fuel cell* merupakan salah satu sumber energi untuk mengisi baterai tanpa harus muncul ke permukaan. Teknologi tersebut biasa disebut *air independent propulsion* atau propulsi tanpa menggunakan udara dari atmosfer. Berikut ini adalah salah satu gambar yang menunjukkan *fuel cell* pada benam.



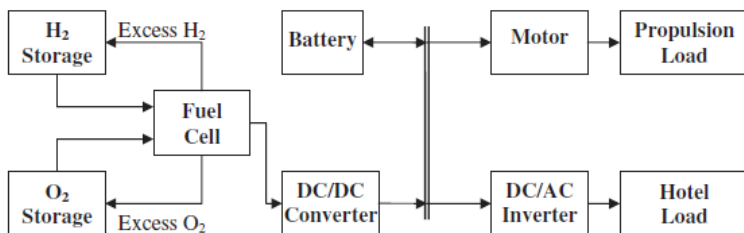


Gambar 2.16 Wahana benam Dolphin Class

Di bawah ini adalah skema perbandingan wahana benam tanpa menggunakan AIP dengan wahana benam yang menggunakan AIP.



Gambar 2.17 Skema wahana benam tanpa AIP



Gambar 2.18 Skema wahana benam dengan AIP

Dari gambar 2.17 dapat dilihat bahwa diesel *tank* yang berisi bahan bakar *diesel engine* digunakan untuk mengisi baterai.

Kemudian dari baterai menuju ke DC/DC *converter* untuk menggerakkan motor dan diteruskan ke sistem propulsi wahana benam. Pada gambar 2.18 menggunakan teknologi AIP, sehingga dari penyimpanan hidrogen dan penyimpanan oksigen menuju ke *fuel cell stack*. Dari *fuel cell stack* menuju ke DC/DC *converter* menuju ke baterai. Dari baterai digunakan untuk menggerakkan motor dan diteruskan ke sistem propulsi. Sedangkan dari DC/AC *inverter* digunakan untuk beban *hotel*. Beban *hotel* adalah lampu-lampu pada wahana benam dan sistem navigasi.

## 2.13 Persamaan-Persamaan Yang Digunakan Dalam Perhitungan Fuel Cell.

### 2.13.1 Perhitungan Tegangan Aktual Fuel Cell

Tegangan aktual dari *fuel cell* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$V = E_{\text{Nernst}} + V_{\text{act}} + V_{\text{ohmic}} + V_{\text{conc}} \quad (2.1)$$

Dimana,

$E_{\text{Nernst}}$  : tegangan Nernst (volt)

$V_{\text{act}}$  : *activation losses* (volt)

$V_{\text{ohmic}}$  : *ohmic losses* (volt)

$V_{\text{conc}}$  : *concentration losses* (volt)

$E_{\text{Nernst}}$  menunjukkan hubungan antara tegangan termodinamika dari *fuel cell* dan reaktan dan konsentrasi produk pada katalis, yang dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$E_{\text{Nernst}} = -\frac{Gf_{(\text{liq})}}{2F} - \frac{RT}{2F} \times \ln\left(\frac{p_{\text{H}_2\text{O}}}{p_{\text{H}_2} x p_{\text{O}_2}^{0,5}}\right) \quad (2.2)$$

Dimana,

$Gf_{(\text{liq})}$  : fungsi gibbs dalam bentuk *liquid*  
(-228,170 J/mol)

R : konstanta gas ideal (8,314 J/K.mol)

T : temperatur (Kelvin)

F : konstanta Faraday (96485,3399 Coulombs)

$p_{H_2O}$  adalah tekanan parsial dari air, yang besarnya dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$p_{H_2O} = 10^x \quad (2.3)$$

dimana,

$p_{H_2O}$  : tekanan parsial dari air (atm)

$x$  adalah tekanan saturasi dari air yang besarnya dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$x = \frac{-2,1794 + 0,02953 x T_c - 9,1837 x 10^{-5} x T_c^2 + 1,4454 x 10^{-7} T_c^3}{x 10^{-7} T_c^3} \quad (2.4)$$

Dimana,

$x$  : tekanan saturasi dari air (atm)

$T_c$  : temperature (celcius)

$p_{H_2}$  adalah tekanan parsial dari hidrogen yang besarnya dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$p_{H_2} = 0,5 \left( \frac{P_{H_2}}{\exp \left( \frac{1,653i}{T_k^{1,334}} \right)} \right) - p_{H_2O} \quad (2.5)$$

Dimana,

$p_{H_2}$  : tekanan parsial dari hidrogen (atm)

$T_k$  : temperature (Kelvin)

$i$  : kerapatan arus (1 A/cm<sup>2</sup>)

$p_{H_2O}$  : tekanan parsial dari air

$p_{O_2}$  adalah tekanan parsial dari oksigen yang besarnya dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$p_{O_2} = \left( \frac{P_{udara}}{\exp \left( \frac{4,192i}{T_k^{1,334}} \right)} \right) - p_{H_2O} \quad (2.6)$$

Dimana,

$p_{O_2}$  : tekanan parsial dari oksigen (atm)

$T_k$  : temperature (Kelvin)

$i$  : kerapatan arus ( $A/cm^2$ )  
 $p_{H_2O}$  : tekanan parsial dari air

$V_{act}$  adalah rugi yang terjadi pada saat awal penarikan arus yang menyebabkan penurunan tegangan sel. Rugi tersebut dapat dihitung dengan persamaan:

$$V_{act} = -b \ln\left(\frac{i}{i_o}\right) \quad (2.7)$$

Dimana,

$i$  : kerapatan arus ( $A/cm^2$ )  
 $i_o$  : pertukaran kerapatan arus ( $A/cm^2$ )

dimana  $b$  dapat dihitung dengan persamaan:

$$b = 2,3 \frac{RT}{2\alpha F} \quad (2.8)$$

Dimana,

$R$  : konstanta gas ideal ( $8,314 J/K.mol$ )  
 $T$  : temperatur (Kelvin)  
 $\alpha$  : koefisien transfer ( $0,5$ )  
 $F$  : konstanta Faraday ( $96485,3399 Coulombs$ )

$V_{ohmic}$  adalah rugi yang diakibatkan oleh tahanan ion di dalam elektrolit dan elektroda, tahanan elektronik di elektroda, pengumpul arus dan interkoneksi, dan tahanan kontak. Besarnya dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$V_{ohmic} = - (i \times r) \quad (2.9)$$

Dimana,

$i$  : kerapatan arus ( $A/cm^2$ )  
 $r$  : konstanta tahanan ohmic ( $0,02$ )

$V_{conc}$  adalah rugi yang terjadi pada saat kerapatan arus yang tinggi, sehingga menyebabkan ketidakmampuan untuk meredakan cukup reaktan ke tempat reaksi sehingga sel mengalami penurunan

performa yang cukup tajam. Rugi ini dapat dihitung melalui persamaan:

$$V_{\text{conc}} = \alpha_1 \times i^k \times \ln\left(1 - \frac{i}{i_L}\right) \quad (2.10)$$

Dimana,

$\alpha_1$  : konstanta amplifikasi (0,085)

$i$  : kerapatan arus (A/cm<sup>2</sup>)

$k$  : konstanta *mass transport* (1,1)

$i_L$  : kerapatan arus terbatas (A/cm<sup>2</sup>)

### 2.13.2 Perhitungan Arus Fuel Cell

Perhitungan arus dari *fuel cell* dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$I = \frac{P}{V} \quad (2.11)$$

Dimana,

$I$  : arus *fuel cell* (ampere)

$P$  : daya fuel cell (watt)

$V$  : tegangan aktual dari *fuel cell* (volt)

### 2.13.3 Perhitungan Konsumsi Hidrogen dan Oksigen

$$n_{H_2} = \frac{1}{2F} \times 3600 \quad (2.12)$$

$$m_{H_2} = \frac{n_{H_2} \times g \text{ mol}}{1000} H_2 \quad (2.13)$$

$$m_{H_2, \text{ consumed}} = I \times m_{H_2} \quad (2.14)$$

Dimana,

$I$  = arus *fuel cell* (kA)

$$n_{O_2, \text{ consumed}} = \frac{m_{H_2, \text{ consumed}}}{2 \times \text{mol } H_2} \quad (2.15)$$

### 2.13.4 Perhitungan Efisiensi

Efisiensi dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$\text{Efisiensi} = \frac{U_f \times V \times 100}{HHV} \quad (2.16)$$

Dimana,

$U_f$  = faktor penggunaan bahan bakar (80%)

$V$  = tegangan aktual *fuel cell* (volt)

$HHV$  = *higher heating value* (1,481 volt)

### 2.13.5 Perhitungan Produksi Air dalam Liter per Jam

Perhitungan produksi air dalam satuan liter per jam dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$\text{Produksi air} = \frac{((\text{Massa molekul dari air}) \times P}{3600 \times V \times F} \quad (2.17)$$

Dimana,

Massa molekul air : 18020

$P$  : daya *fuel cell* (watt)

$V$  : tegangan aktual *fuel cell* (volt)

$F$  : konstanta Faraday

### 2.13.6 Perhitungan Kebutuhan Energi Minimal per Jam

$$\text{Energi total} = \text{jumlah } cell \times \text{tegangan tiap } cell \times \text{kapasitas} \quad (2.18)$$

Kebutuhan minimal per jam =

$$\frac{\text{Energi total baterai kapal selama}}{\text{endurance}} \quad (2.19)$$

### 2.13.7 Perhitungan Endurance Wahana Benam dengan Menggunakan Sistem Air Independent Propulsion dengan Jenis Fuel Cell

$$\text{Lama pengisian baterai} = \frac{\text{Kapasitas Baterai}}{I} \quad (2.20)$$

$$\text{Konsumsi hidrogen tiap pengisian} = \frac{\text{lama pengisian baterai} \times \text{konsumsi } H_2 \text{ per jam}}{\text{kapasitas tangki hidrogen}} \quad (2.21)$$

$$\text{Total hidrogen dapat mengisi} = \frac{\text{kapasitas tangki hidrogen}}{\text{konsumsi hidrogen tiap pengisian}} \quad (2.22)$$

$$\text{Endurance wahana benam dengan AIP} = \frac{\text{total hidrogen dapat mengisi} \times \text{lama penggunaan baterai}}{24} \quad (2.23)$$

## **BAB III**

### **METODOLOGI PENELITIAN**

Metodologi penelitian adalah sebuah ilmu yang mempelajari cara melakukan pengamatan dengan pemikiran yang tepat secara terpadu melalui tahapan yang disusun secara ilmiah untuk mencari, menganalisa, menyimpulkan sehingga dapat digunakan untuk menemukan, mengembangkan maupun menguji kebenaran sebuah pengetahuan. Urutan metodologi penelitian pada pengerjaan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

#### **3.1 Studi Literatur**

Studi literatur ini dilakukan dengan tujuan untuk memperdalam pemahaman mengenai pengetahuan yang menunjang dalam penyelesaian permasalahan dari tugas akhir ini. Studi literatur dilakukan dengan mencari data tertulis atau referensi yang mendukung dan berkaitan dengan masalah yang diteliti meliputi buku teori, jurnal, laporan hasil penelitian yang terkait dengan masalah penelitian diatas.

#### **3.2 Penentuan Spesifikasi Fuel Cell**

Penentuan spesifikasi *fuel cell* dilakukan terlebih dahulu dengan mengacu pada produk *fuel cell* yang ada di pasaran dan dari data wahana benam pembanding, kemudian dilakukan perhitungan efisiensi, rata-rata tegangan sel, konsumsi hidrogen, dan perhitungan efisiensi sistem *fuel cell* tersebut. Pada tugas akhir ini dipilih sistem *fuel cell* PEM Siemens 120 kW.

#### **3.3 Perhitungan Tegangan Aktual Fuel Cell**

Tegangan aktual dari *fuel cell* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$V = E_{\text{Nernst}} + V_{\text{act}} + V_{\text{ohmic}} + V_{\text{conc}}$$

Dimana,

$E_{\text{Nernst}}$  : tegangan Nernst (volt)

$V_{\text{act}}$  : *activation losses* (volt)

$V_{\text{ohmic}}$  : *ohmic losses* (volt)

$V_{\text{conc}}$  : *concentration losses* (volt)



$E_{\text{Nernst}}$  menunjukkan hubungan antara tegangan termodinamika dari *fuel cell* dan reaktan dan konsentrasi produk pada katalis,  $V_{\text{act}}$  adalah rugi yang terjadi pada saat awal penarikan arus yang menyebabkan penurunan tegangan sel.  $V_{\text{ohmic}}$  adalah rugi yang diakibatkan oleh tahanan ion di dalam elektrolit dan elektroda, tahanan elektronik di elektroda, pengumpul arus dan interkoneksi, dan tahanan kontak.  $V_{\text{conc}}$  adalah rugi yang terjadi pada saat kerapatan arus yang tinggi, sehingga menyebabkan ketidakmampuan untuk meredakan cukup reaktan ke tempat reaksi sehingga sel mengalami penurunan performa yang cukup tajam.

### 3.4 Perhitungan Arus Fuel Cell

Perhitungan arus dari *fuel cell* dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$I = \frac{P}{V}$$

Dimana,

$I$  : arus *fuel cell* (ampere)

$P$  : daya *fuel cell* (watt)

$V$  : tegangan aktual dari *fuel cell* (volt)

### 3.5 Perhitungan Konsumsi dan Kapasitas Tangki Hidrogen dan Oksigen

Perhitungan konsumsi hidrogen dan oksigen dilakukan untuk mengetahui berapa konsumsi dalam satuan kg per jamnya. Kemudian ditentukan berapa kapasitas dari hidrogen dan oksigen tersebut.

### 3.6 Perhitungan Produksi Air

Perhitungan produksi air dalam satuan liter per jam dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$\text{Produksi air} = \frac{((\text{Massa molekul dari air}) \times P}{3600 \times V \times F}$$

Dimana,

Massa molekul air : 18020

$P$  : daya *fuel cell* (watt)

$V$  : tegangan aktual *fuel cell* (volt)

$F$  : konstanta Faraday

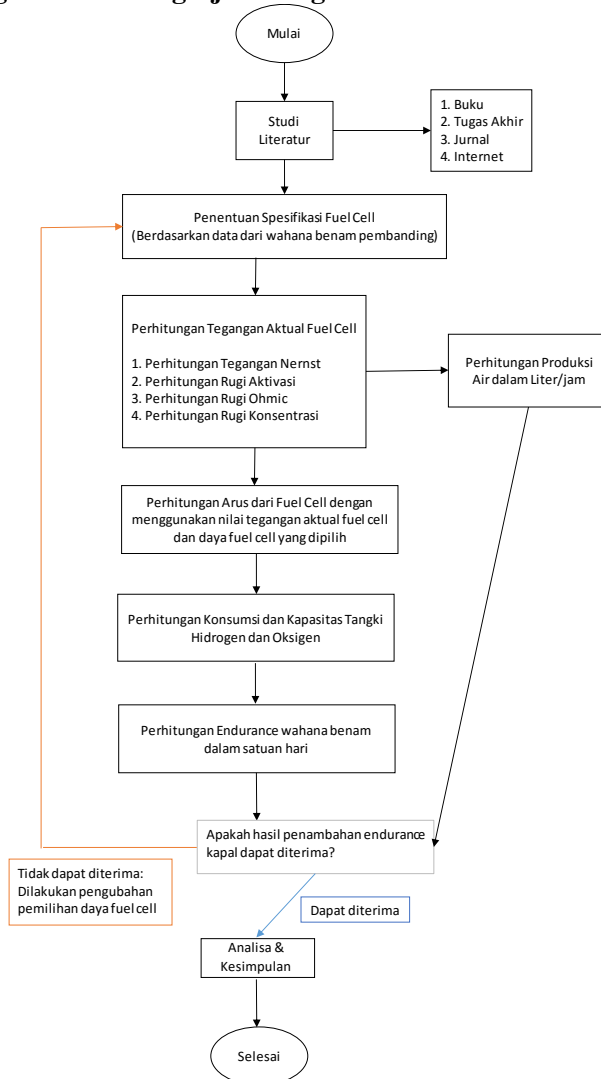
### **3.7 Perhitungan Endurance Wahana Benam dengan Menggunakan Fuel Cell**

Perhitungan ini memerlukan hasil analisa dari berapa kapasitas baterai wahana benam, arus dari *fuel cell*, kapasitas tangki hidrogen, dan lama pengisian baterai hingga penuh. Kemudian akan didapatkan berapa lama *endurance* yang didapatkan dari penambahan sistem *fuel cell* tersebut.

### **3.8 Analisa dan Kesimpulan**

Pada tahap ini akan dilakukan analisa dari hasil perhitungan dan kesimpulan diantaranya adalah jumlah konsumsi hidrogen dan oksigen, kapasitas tangki hidrogen dan oksigen, jumlah air yang dihasilkan dari sistem *fuel cell*, dan berapa lama penambahan *endurance* wahana benam dengan menggunakan sistem *air independent propulsion* dengan jenis *fuel cell*.

### 3.9 Diagram Alir Pengerjaan Tugas khir



Gambar 3.1 Diagram alir pengerjaan tugas akhir

## BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Analisa Data Wahana Benam Pembanding

Wahana benam tipe 212 adalah sebuah wahana benam diesel elektrik yang dibuat oleh *Howaldtswerke-Deutsche Werft AG* (HDW) untuk Jerman. Wahana benam ini ditenagai oleh mesin diesel dan sistem propulsi-bebas udara *air-independent propulsion* (AIP) dengan sel bahan bakar hidrogen dengan *proton exchange membrane* (PEM) buatan Siemens. Untuk ukuran utama wahana benam tersebut adalah sebagai berikut:

Tabel 4.1 Spesifikasi Wahana Benam Tipe-212

Wahana Benam Tipe-212	
Panjang	57,2 meter
Lebar	7 meter
Draft	6 meter
Tenaga Pendorong	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diesel Generator 1 bh MTU-396 16 V 2150 kW</li> <li>• Motor Pendorong Pokok Siemens Permasyn Electric Motor 1700 kW</li> <li>• HDW/Siemens PEM fuel cell with 120 kW</li> </ul>
Kecepatan	20 knots menyelam, 12 knots mengapung
Jangkauan	8000 Nm pada 8 knots mengapung 3 minggu tanpa snorkeling, atau 12 minggu keseluruhan
Daya Tahan	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mengapung: 14800 km pada 8 knots</li> <li>• Menyelam: 780 km pada 8 knots</li> <li>• Snorkeling: 5556 km pada 4 knots</li> </ul>

Sedangkan data ukuran utama wahana benam yang digunakan pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

Tabel 4.2 Spesifikasi Wahana Benam Objek untuk Penelitian Tugas Akhir

Objek	
Panjang	59,57 meter
Lebar	6,2 meter
Draft	5,5 meter
Tenaga Pendorong	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diesel Generator 4 bh 441,299 kW</li> <li>• Motor Pendorong Pokok 1 bh double jangkar (2 x 1850 kW pada 200 RPM)</li> </ul>
Kecepatan	21,5 knots menyelam, 11 knots mengapung
Jangkauan	11000 Nm pada 6 knots mengapung 50 hari dengan persediaan logistic terpenuhi.
Daya Tahan	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Menyelam: 333,36 km pada 10 knots</li> <li>• Snorkeling: 666,72 km pada 6 knots</li> </ul>

Dari kedua data tersebut terdapat selisih sedikit perbedaan untuk ukuran dimensi karena itu pada tugas akhir ini dianalisa sistem *fuel cell* PEM Siemens 120 kW.

#### 4.2 Spesifikasi Fuel Cell dan Baterai

Pada tugas akhir ini diketahui spesifikasi baterai yang digunakan adalah sebagai berikut:

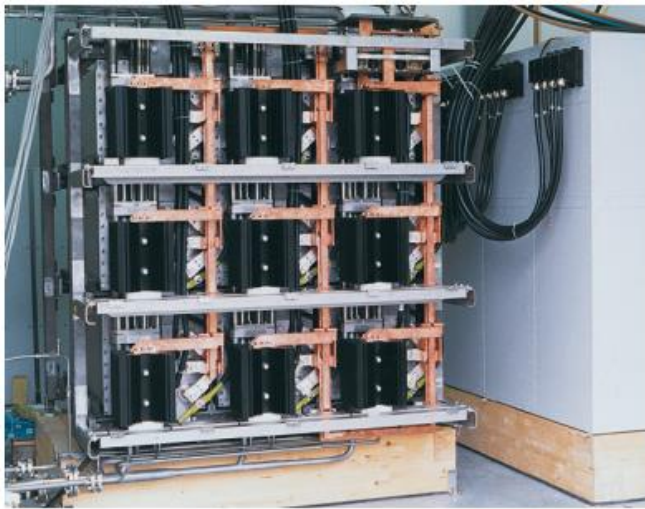
Tabel 4.3 Spesifikasi Baterai dari Objek yang Diteliti

Jumlah	=	480 cell
Tegangan	=	2-3 volt/cell
Kapasitas	=	10260 Ah
Dimensi	=	(1421 x 290 x 450) mm <sup>3</sup>
Berat	=	525±2 KG

Kemudian, diketahui spesifikasi *fuel cell* yang dipilih adalah:

Tabel 4.4 Spesifikasi *Fuel Cell* yang Dipilih

Type	FCM 120
Rated Power	120 kW
Voltage Range	208-243
Operating Temperature	75°C
H <sub>2</sub> Pressure	2,3 bar abs
O <sub>2</sub> Pressure	2,6 bar abs
Dimensions	H = 50 cm W = 53 cm L = 176 cm
Weight (without module electronics)	900 kg



Gambar 4.1 Modul PEM Fuel Cell 120kW yang ditata di test rack

### 4.3 Tabel dari Parameter yang Digunakan untuk Perhitungan

Tabel 4.5 Parameter yang Digunakan untuk Perhitungan

Simbol	Parameter	Nilai
F	Konstanta Faraday	96485,3399 Coulombs
$Gf_{(liq)}$	Fungsi Gibbs dalam Bentuk Liquid	-228,170 J/mol
HHV	Higher Heating Value	1,481 V
i	Kerapatan Arus	1 A/cm <sup>2</sup>
$i_L$	Kerapatan Arus Terbatas	1,4 A/cm <sup>2</sup>
$i_o$	Pertukaran Kerapatan Arus	$10^{-6,912}$ A/cm <sup>2</sup>
k	Konstanta <i>Mass Transport</i>	1,1
$P_{H_2}$	Tekanan Hidrogen	1 atm
$P_{udara}$	Tekanan Udara	1 atm
r	Konstanta Tahanan Ohmic	0,02 ohm-cm <sup>2</sup>
R	Konstanta Gas Ideal	8,314 J/K.mol
Tc	Temperatur dalam Celcius	75°C
Tk	Temperatur dalam Kelvin	348,15 K
$U_f$	Faktor Penggunaan Bahan Bakar	80%
$\alpha$	Koefisien Transfer	0,5
$\alpha_1$	Konstanta Amplifikasi	0,085

### 4.4 Perhitungan Tekanan Saturasi dari Air

Tekanan saturasi dari air dihitung dengan menggunakan persamaan (2.4)

$$X = -2,1794 + 0,02953 \times T_c - 9,1837 \times 10^{-5} \times T_c^2 + 1,4454 \times 10^{-7} T_c^3$$

$$X = -2,1794 + 0,02953 \times 75 - 9,1837 \times 10^{-5} \times 75^2 + 1,4454 \times 10^{-7} \times 75^3$$

$$X = -0,4382553$$

#### 4.5 Perhitungan Tekanan Parsial Air

Tekanan parsial air dihitung dengan menggunakan persamaan (2.3).

$$p_{H_2O} = 10^x$$

$$p_{H_2O} = 10^{-0,4382553}$$

$$p_{H_2O} = 0,36453958 \text{ atm.}$$

#### 4.6 Perhitungan Tekanan Parsial Hidrogen

Tekanan parsial hidrogen dihitung dengan menggunakan persamaan (2.5).

$$P_{H_2} = 0,5 \left( \frac{P_{H_2}}{\exp\left(\frac{1,653i}{T_k^{1,334}}\right)} \right) - P_{H_2O}$$

$$P_{H_2} = 0,5 \left( \frac{1}{\exp\left(\frac{1,653 \times 1}{348,15^{1,334}}\right)} \right) - 0,36453958$$

$$P_{H_2} = 0,13512439 \text{ atm.}$$

#### 4.7 Perhitungan Tekanan Parsial Oksigen

Tekanan parsial oksigen dihitung dengan menggunakan persamaan (2.6).

$$P_{O_2} = \left( \frac{P_{udara}}{\exp\left(\frac{4,192i}{T_k^{1,334}}\right)} \right) - P_{H_2O}$$

$$P_{O_2} = \left( \frac{1}{\exp\left(\frac{4,192 \times 1}{348,15^{1,334}}\right)} \right) - 0,36453958$$

$$P_{O_2} = 0,63375695 \text{ atm.}$$



#### 4.8 Perhitungan Ohmic Losses

Rugi ohmic dihitung dengan menggunakan persamaan (2.9).

$$V_{\text{ohmic}} = - (i \times r)$$

$$V_{\text{ohmic}} = - (1 \times 0,02)$$

$$V_{\text{ohmic}} = - 0,02 \text{ volt.}$$

#### 4.9 Perhitungan Concentration Losses

Rugi konsentrasi dihitung dengan menggunakan persamaan (2.10).

$$V_{\text{conc}} = \alpha_1 \times i^k \times \ln\left(1 - \frac{i}{i_L}\right)$$

$$V_{\text{conc}} = 0,085 \times 1^{1,1} \times \ln\left(1 - \frac{1}{1,4}\right)$$

$$V_{\text{conc}} = - 0,1064849 \text{ volt.}$$

#### 4.10 Perhitungan Activation Losses

Rugi aktivasi dihitung dengan menggunakan persamaan (2.8) dan (2.7).

$$b = 2,3 \frac{RT}{2\alpha F}$$

$$b = 2,3 \frac{8,314 \times 348,15}{2 \times 0,5 \times 96485,3399}$$

$$b = 0,06899902$$

$$V_{\text{act}} = -b \ln\left(\frac{i}{i_o}\right)$$

$$V_{\text{act}} = -0,06899902 \ln\left(\frac{1}{10^{-6,912}}\right)$$

$$V_{\text{act}} = - 1,0981517 \text{ volt.}$$

#### 4.11 Perhitungan Tegangan Nernst

Tegangan Nernst dihitung dengan menggunakan persamaan (2.2).

$$E_{\text{Nernst}} = - \frac{Gf_{(liq)}}{2F} - \frac{RT}{2F} \times \ln\left(\frac{p_{H_2O}}{p_{H_2} \times p_{O_2}^{0,5}}\right)$$

$$E_{\text{Nernst}} = - \frac{-228,17}{2 \times 96485,3399} - \frac{8,314 \times 348,15}{2 \times 96485,3399} \times \ln\left(\frac{0,36453958}{0,13512439 \times 0,633751695^{0,5}}\right)$$

$$E_{\text{Nernst}} = -0,0171246 \text{ volt.}$$

#### 4.12 Perhitungan Tegangan Aktual Fuel Cell

Tegangan aktual *fuel cell* dihitung dengan menggunakan persamaan (2.1).

$$V = E_{\text{Nernst}} + V_{\text{act}} + V_{\text{ohmic}} + V_{\text{conc}}$$

$$V = -0,0171246 - 1,0981517 - 0,02 - 0,1064849$$

$$V = -1,2417612 \text{ volt.}$$

#### 4.13 Perhitungan Arus Fuel Cell

Perhitungan arus *fuel cell* dihitung dengan menggunakan persamaan (2.11).

$$I = \frac{P}{V}$$

$$I = \frac{120000}{1,2417612}$$

$$I = 96636,9379 \text{ A}$$

$$I = 96,6369379 \text{ kA.}$$

#### 4.14 Perhitungan Konsumsi Hidrogen

Pertama-tama dilakukan terlebih dahulu perhitungan mol hidrogen yang dibebaskan untuk setiap 1 ampere, menggunakan persamaan (2.12).

$$n_{\text{H}_2} = \frac{1}{2F} \times 3600$$

$$n_{\text{H}_2} = \frac{1}{2 \times 96485,3399} \times 3600$$

$$n_{\text{H}_2} = 0,01865568 \frac{\text{g. mol}}{\text{hr} - \text{A}} \text{H}_2$$

kemudian menggunakan persamaan (2.13).

$$m_{\text{H}_2} = \frac{n_{\text{H}_2} \times \text{g mol}}{1000} \text{H}_2$$

$$m_{\text{H}_2} = \frac{0,01865568 \times 2,0158}{1000}$$

$$m_{\text{H}_2} = 3,7606 \times 10^{-5} \frac{\text{kg H}_2}{\text{hr} - \text{A}}$$

$$m_{\text{H}_2} = 0,03760613 \frac{\text{kg H}_2}{\text{hr} - \text{A}}$$

$$m_{H_2} = 0,08290722 \frac{lb H_2}{hr - kA}$$

kemudian menggunakan persamaan (2.14).

$$\begin{aligned} m_{H_2, \text{ consumed}} &= I \times m_{H_2} \\ m_{H_2, \text{ consumed}} &= 96,6369379 \times 0,08290722 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} m_{H_2, \text{ consumed}} &= 8,0118996 \frac{lb H_2}{hr} \\ m_{H_2, \text{ consumed}} &= 3,63413373 \frac{kg H_2}{hr} \end{aligned}$$

Kemudian untuk kebutuhan konsumsi oksigen, diperhatikan rasio stoikiometri dari hidrogen dan oksigen pada  $H_2O$  adalah 2:1. Maka, mol dari oksigen yang dibutuhkan untuk reaksi *fuel cell* dapat dihitung dengan persamaan (2.15).

$$n_{O_2, \text{ consumed}} = \frac{m_{H_2, \text{ consumed}}}{2 \times mol H_2}$$

$$n_{O_2, \text{ consumed}} = \frac{8,0118996}{2 \times 2,0158}$$

$$n_{O_2, \text{ consumed}} = 1,98727551 \frac{lb mol O_2}{hr}$$

$$n_{O_2, \text{ consumed}} = 0,90141228 \frac{kg mol O_2}{hr}$$

Langkah selanjutnya adalah menentukan spesifikasi *metal hydride cylinder storage* untuk penyimpanan hidrogen, dan *LOX tank* untuk menyimpan oksigen.

Berikut ini adalah spesifikasi yang dipilih:

HYDROGEN CAPACITY					PRICES		
	Alloys LMH		Alloy A		MODEL	MATERIAL	RETAIL PRICE US\$
MODEL	Std. liters*	SCF**	Std. liters*	SCF**			
BL-18	18	0.67	20	0.76	BL-18	C-STEEL	\$431 each
BL-20	20	0.76	21	0.80	BL-20	STAINLESS	\$844 each
BL-30	30	1.14	34	1.30	BL-30	STAINLESS	\$844 each
BL-60	60	2.28	69	2.64	BL-60	STAINLESS	\$1239 each
BL-120	120	4.60	135	5.19	BL-120	STAINLESS	\$1904 each
BL-220	220	8.28	242	9.20	BL-220	STAINLESS	\$2921 each
BL-740	740	28.20	822	31.28	BL-740	STAINLESS	\$4684 each
CL-370	334	12.72	370	14.00	CL-370	ALUMINUM	\$1053 each
CL-910	819	31.14	910	31.96	CL-910	ALUMINUM	\$2425 each
					Special	STAINLESS	Per HCI quote
						PREFERRED	

Gambar 4.2 Spesifikasi Metal Hydride Cylinder Storage

Tangki penyimpanan hidrogen yang dipilih adalah:

Tabel 4.6 Tangki penyimpanan hidrogen

Brand	Hydrogen Components
Model	CL-910
Capacity	819 liter (819 kg)
Material	Stainless

Sedangkan untuk LOX tank adalah sebagai berikut:

Technical data - tanks for air gases LIN, LOX, LAR.

Size		30	60	110	200	300	490	610
Max. allowable working pressure	air gases: 18 bar, 36 bar							
Gross capacity								
Net capacity	approx. litre	18 bar	3,000	6,050	10,960	19,340	28,700	46,570
		36 bar	2,840	5,730	10,380	18,320	27,180	44,120

Gambar 4.3 Spesifikasi LOX Tanks

Tangki penyimpanan oksigen yang dipilih adalah sebagai berikut:

Tabel 4.7 Tangki penyimpanan oksigen

Brand	Linde
Size	30
Net Capacity	3000 liter (3000 kg)

#### 4.15 Perhitungan Efisiensi

Efisiensi dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (2.16).

$$\text{Efisiensi} = \frac{U_f \times V \times 100}{HHV}$$

$$\text{Efisiensi} = \frac{80\% \times 1,2417612 \times 100}{1,481}$$

$$\text{Efisiensi} = 67,0769048 \%$$

#### 4.16 Perhitungan Produksi Air dalam Liter per Jam

Air yang dihasilkan akibat dari proses reaksi yang terjadi pada *fuel cell* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (2.17).

$$\text{Produksi air} = \frac{((\text{Massa molekul dari air}) \times P}{3600 \times V_{FC} \times F}$$

$$\text{Produksi air} = \frac{((18020) \times 120000}{3600 \times 1,2417612 \times 96485,3399}$$

$$\text{Produksi air} = 5,0134203 \text{ liter/jam.}$$

#### 4.17 Perhitungan Kebutuhan Energi Minimal per Jam

Diketahui data yang ditulis dalam tabel berikut.

Tabel 4.8 Data Spesifikasi Baterai dan *Endurance* wahana benam

Jumlah Cell	480	cell
Tegangan Tiap Cell	2	volt/cell
Kapasitas	10260	Ah
Endurance	1200	jam

Sehingga dapat dihitung energi total baterai pada wahana benam dengan menggunakan persamaan (2.18).

Energi total = Jumlah cell x Tegangan tiap cell x Kapasitas

Energi total = 9849600 Wh.

Kemudian dihitung kebutuhan minimal energi per jam dengan menggunakan persamaan (2.19).

Kebutuhan minimal per jam =  $\frac{\text{Energi total baterai kapal selama endurance}}{\text{endurance}}$

Kebutuhan minimal per jam =  $\frac{9849600}{1200}$

Kebutuhan minimal per jam = 8208 Watt/jam.

#### 4.18 Lama Wahana Benam Dapat Bergerak

Lama wahana benam dapat bergerak dari setelah pengisian penuh dengan penggunaan arus konstan secara terus menerus adalah selama 100 jam.

#### 4.19 Perhitungan Penambahan Endurance Wahana Benam dengan Menggunakan Sistem Air Independent Propulsion dengan Jenis Fuel Cell

Langkah yang pertama, dihitung terlebih dahulu berapa arus untuk mengisi baterai wahana benam, dimana daya *fuel cell* adalah 120000 watt dan tegangan dari *fuel cell* sebesar 380 Volt yang dihitung dengan persamaan.

$$I = \frac{P}{V}$$

$$I = \frac{120000}{380}$$

Arus dari *fuel cell* adalah 315,7985 Ampere. Dengan begitu dapat diketahui lama pengisian baterai dengan menggunakan *fuel cell*. Lama pengisian baterai dengan *fuel cell* dihitung dengan menggunakan persamaan (2.20)

Lama pengisian baterai =  $\frac{\text{Kapasitas Baterai}}{I}$

Lama pengisian baterai =  $\frac{10260}{315,7985}$

Lama pengisian baterai = 32,49 jam.

Diketahui kapasitas penyimpanan hidrogen adalah 819 kg, dan kapasitas penyimpanan LOX adalah 3000 kg, dengan konsumsi hidrogen sebesar 3.63413373 kg/jam dan konsumsi oksigen sebesar 0.90141228 kg/jam. Sehingga dari nilai tersebut dapat dihitung berapa total jumlah hidrogen dapat dikonsumsi untuk sistem *fuel cell* tiap satu kali pengisian dengan menggunakan persamaan (2.21).

Total jumlah hidrogen dikonsumsi =  
*lama pengisian x konsumsi H<sub>2</sub> per jam*

Total jumlah hidrogen dikonsumsi = 32,49 x 3,63413373

Total jumlah hidrogen dikonsumsi = 118,073 kg.

Dari total jumlah hidrogen dikonsumsi tiap satu kali pengisian dapat dihitung berapa kali sistem *fuel cell* dapat mengisi baterai hingga penuh dengan menggunakan persamaan (2.22).

Total jumlah pengisian baterai =  

$$\frac{\text{Kapasitas tangki hidrogen}}{\text{total jumlah hidrogen dikonsumsi}}$$

Total jumlah pengisian baterai =  $\frac{819}{118,073}$

Total jumlah pengisian baterai = 6,936387 kali pengisian.

Didapatlah bahwa sistem *fuel cell* dapat mengisi baterai hingga penuh tanpa *snorkeling* sebanyak 6,936387 kali. Kemudian dihitung berapa *endurance* wahana benam dengan menggunakan *fuel cell* dengan menggunakan persamaan (2.23).

*Endurance dengan fuel cell* =  

$$\frac{\text{total jumlah pengisian baterai} \times \text{lama kapal dapat bergerak}}{24}$$

*Endurance dengan fuel cell* =  $\frac{6,936387 \times 100}{24}$

*Endurance dengan fuel cell* = 28,90161 hari.

Sehingga didapatkan hasil dari penambahan sistem *air independent propulsion* dengan jenis *fuel cell* sebagai berikut:

Tabel 4.9 Hasil Perhitungan

Konsumsi Hidrogen	3,63 kg/jam
Konsumsi Oksigen	0,9 kg/jam
Produksi Air	5,01 liter/jam
Kapasitas Hidrogen	819 kg
Kapasitas LOX	3000 kg
Lama Pengisian Baterai	32,49 jam
Endurance dengan <i>Fuel Cell</i>	28,9 hari

#### 4.20 Perbandingan Daya Selam Sebelum dan Sesudah Menggunakan Sistem AIP Fuel Cell

Setelah didapatkan hasil penambahan *endurance* dari penggunaan sistem AIP maka didapat perbandingan sebagai berikut:

Tabel 4.10 Perbandingan *endurance* sebelum dan sesudah menggunakan sistem AIP untuk wahana benam objek

Objek	
Tidak menggunakan AIP	Menggunakan AIP Fuel Cell
Endurance: 50 hari	Endurance: $50 + 28,9 = 78,9$ hari

Dari data diatas maka dapat disimpulkan bahwa penambahan *fuel cell* dapat menambah sebesar 57,8 % dari *endurance* wahana benam dengan tanpa menggunakan sistem *air independent propulsion*.

Sedangkan untuk wahana benam pembanding hasil dari penambahan sistem *air independent propulsion* adalah sebagai berikut:

Tabel 4.11 Perbandingan *endurance* sebelum dan sesudah menggunakan sistem AIP untuk wahana benam pembanding

Wahana Benam U-212	
Tidak menggunakan AIP	Menggunakan AIP Fuel Cell
Endurance: 63 hari	Endurance: $63 + 21 = 84$ hari



Dari data tersebut maka dapat disimpulkan bahwa penambahan *fuel cell* dapat menambah sebesar 33,33 % dari *endurance* wahana benam dengan tanpa menggunakan sistem *air independent propulsion*. Meskipun daya *fuel cell* yang digunakan oleh wahana benam pembandingan sama dengan wahana benam objek (120kW) tetapi wahana benam objek dapat memberi tambahan *endurance* sebesar 57,8% dari total *endurance* wahana benam sebelum menggunakan AIP. Hal tersebut dapat terjadi karena pengaruh dari konsumsi hidrogen dan oksigen, jumlah kapasitas tangki hidrogen dan oksigen serta besarnya kapasitas baterai yang berbeda.

## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

1. Spesifikasi *fuel cell* yang dipilih adalah PEM Siemens FCM 120 dengan daya 120 kW dengan temperatur pada saat beroperasi sebesar 75°C.
2. Kebutuhan konsumsi hidrogen didapatkan dari mol hidrogen yang dilepaskan tiap menghasilkan 1 Ampere didapat konsumsi hidrogen sebesar 3,63 kg/jam. Sedangkan kebutuhan konsumsi oksigen didapatkan dengan memperhatikan rasio stoikiometri dari hidrogen dan oksigen pada H<sub>2</sub>O yaitu 2:1. Sehingga didapatkan kebutuhan konsumsi oksigen sebesar 0,9 kg/jam.
3. Kapasitas tangki yang dipilih untuk tangki hidrogen sebesar 819 kg dan untuk oksigen sebesar 3000 kg. Dengan menghitung dari kapasitas tangki yang terkecil yaitu tangki hidrogen maka didapatkan bahwa dengan kapasitas 819 kg dapat melakukan pengisian baterai sebanyak  $\pm 7$  kali pengisian.
4. *Fuel Cell* selain menghasilkan arus listrik juga menghasilkan energi panas serta air akibat reaksi dari molekul hidrogen dan oksigen. Dengan diketahuinya daya *fuel cell* serta tegangan *fuel cell* maka produksi air dapat dihitung sebesar 5,01 liter/jam. Air tersebut dapat dimanfaatkan sebagai pemanas suhu di dalam wahana benam, dan konsumsi awak wahana benam.
5. Dengan diketahuinya kapasitas baterai, lama wahana benam dapat bergerak saat terisi penuh, konsumsi hidrogen, kapasitas hidrogen, konsumsi oksigen, kapasitas oksigen, arus yang dihasilkan dari *fuel cell* maka didapatlah bahwa penambahan *fuel cell* dapat menambah *endurance* wahana benam selama 28,9 hari. Sistem AIP *fuel cell* dapat menambah *endurance* sebesar 57,8%.

## 5.2 Saran

Dari penelitian yang penulis lakukan, penulis ingin menyampaikan beberapa saran agar tugas akhir ini dapat dikembangkan dengan lebih baik lagi, berikut adalah beberapa saran yang ingin penulis sampaikan:

1. Berbagai kapasitas daya dari *fuel cell* dapat dianalisa untuk mengetahui hubungan dari konsumsi hidrogen, oksigen, produksi air, dan *endurance* dari wahana benam.
2. Untuk penelitian selanjutnya dapat menggunakan bahan bakar methanol untuk menggantikan hidrogen karena hidrogen memiliki kelemahan yaitu membutuhkan tempat yang besar dan cukup berat untuk disimpan di wahana benam.
3. Sistem *air independent propulsion* dengan jenis *fuel cell* yang lain seperti, *alkaline fuel cell*, *phosphoric acid fuel cell*, *carbonate fuel cell*, dan *solid oxide fuel cell* dapat diteliti dan dianalisa perbandingan efisiensi, konsumsi bahan bakar, dan penambahan *endurance* untuk wahana benam.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Wikipedia 2016. Air-Independent Propulsion. Diambil dari [https://en.wikipedia.org/wiki/Air-independent\\_propulsion](https://en.wikipedia.org/wiki/Air-independent_propulsion). Terakhir diakses pada Agustus 2016.
- [2] Wikipedia 2016. Kapal Selam. Diambil dari [https://id.wikipedia.org/wiki/Kapal\\_selam](https://id.wikipedia.org/wiki/Kapal_selam). Terakhir diakses pada Agustus 2016.
- [3] Wikipedia 2016. Diving Plane. Diambil dari [https://en.wikipedia.org/wiki/Diving\\_plane](https://en.wikipedia.org/wiki/Diving_plane). Terakhir diakses pada Agustus 2016.
- [4] A. Psoma, G. Sattler 2002. Fuel Cell Systems for Submarines: From The First Idea to Serial Production.
- [5] Kopp, Carlo 2010. Air Independent Propulsion-now a necessity.
- [6] LIPI 2005. Energi Hijau Berlimbah Uap Air. Diambil dari <http://www.energi.lipi.go.id/utama.cgi?artikel&1111012997&6>. Terakhir diakses pada Agustus 2016.
- [7] SIEMENS 2016. SINAVY PEM Fuel Cell For Submarines.
- [8] U.S Department of energy 2000. Fuel Cell Handbok (EG&G Services Parsons, Inc.)
- [9] DSME 2010. General of AIP System.
- [10] Wikimedia Commons 2013. Scheme of Pressure & Outer Submarine Hulls. Diambil dari [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Scheme\\_of\\_pressure\\_%26\\_outer\\_submarine\\_hulls.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Scheme_of_pressure_%26_outer_submarine_hulls.svg). Terakhir diakses pada September 2016.
- [11] Kabza, Alexander 2015. Fuel Cell Formulary.
- [12] Kuncoro, Dhanar Dwi., Rudy Setiabudy. 2008. Simulasi Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) Sebagai Pembangkit Listrik Perumahan. Depok: Skripsi, Departemen Teknik Elektro, Universitas Indonesia.

- [13] Spiegel, Coleen. 2008. PEM Fuel Cell Modeling and Simulation using MATLAB
- [14] EG&G Technical Services, Inc. 2004. Fuel Cell Handbook.
- [15] Toyota. Toyota Mirai. Diambil dari <https://ssl.toyota.com/mirai/fcv.html>. Terakhir diakses pada Desember 2016.

## **BIODATA PENULIS**



Penulis dilahirkan di Gresik, 7 Maret 1994 dengan nama lengkap Muhammad Nuraga Lazuardy Ramadhan. Penulis merupakan anak pertama dari pasangan Triyoga Widya Wahono dan Nurul Sulistyorini. Penulis telah menempuh pendidikan formal yakni di SDN Dr. Sutomo 8 Surabaya, SMP Negeri 1 Surabaya, SMA Negeri 2 Surabaya, dan terakhir melanjutkan pendidikan di Institut Teknologi Sepuluh Nopember mengambil Departemen Teknik Sistem Perkapalan pada tahun 2012 terdaftar dengan NRP 4212100117. Selama masa perkuliahan penulis pernah mengikuti kegiatan kerja praktek di PT. Antakesuma Inti Raharja dan di Terminal LPG Semarang. Di Departemen Teknik Sistem Perkapalan, penulis mengambil Bidang Studi Marine Electrical and Automation System.